

51  
2el.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

ESTUDIO QUIMICO DE SEDIMENTOS LITORALES  
DEL GOLFO DE CALIFORNIA

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**Q U I M I C A**  
**P R E S E N T A :**  
**RUTH ESTHER VILLANUEVA ESTRADA**



MEXICO, D. F.

1997

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

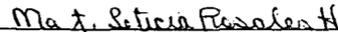
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO**

<b>PRESIDENTE</b>	Prof. Bello Garcés Silvia
<b>VOCAL</b>	Prof. Arriola Santamaria Humberto
<b>SECRETARIO</b>	Prof. Rosales Hoz Maria Tomasa Leticia
<b>1er. SUPLENTE</b>	Prof. Villanueva Gonzalez Pedro
<b>2o. SUPLENTE</b>	Prof. Sosa Hernández Plinio Jesús

Lugar donde se realizó la tesis:

**INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
LABORATORIO DE QUÍMICA MARINA Y CONTAMINACIÓN**



María Tomasa Leticia Rosales Hoz

ASESOR



Ruth Esther Villanueva Estrada

SUSTENTANTE

## **AGRADECIMIENTOS.**

**A la Dra Leticia Resales Hoz por su apoyo en la elaboración de esta tesis como responsable del proyecto, así como su amistad, confianza y paciencia para conmigo.**

**A los profesores Silvia Belto Garcés y Humberto Arriola Santamaria, que por sus observaciones ayudaron a enriquecer este trabajo**

**Al Dr. Arturo Carranza Edwards por su apoyo y asesoría en la redacción de la tesis en cuanto a los aspectos geológicos**

**A CONACYT por su apoyo a través del proyecto de investigación titulado "Investigación Composicional sobre arenas de playa" (Clave 3477T)**

**A la Q F B Susana Santiago Pérez por su ayuda en la parte técnica de la tesis y como amiga, por su amistad y confianza**

**A las autoridades y al personal del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por su apoyo para la realización de este trabajo**

**A las autoridades y personal de la Administración Central de Laboratorio y Servicios Científicos de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público**

**A las autoridades de la Facultad de Química, así como a todos mis maestros de la Facultad de Química y en especial al Maestro Pedro Villanueva González**

**A todos mis compañeros de carrera y en especial a mi amigo Alfonso Olivera Salas por su amistad y por sus consejos**

**A mis compañeros del laboratorio de Química Marina y Contaminación.**

## **DEDICATORIAS.**

**A mis padres: ENRIQUETA ESTRADA GARCÍA y PEDRO VILLANUEVA GONZÁLEZ, que me brindaron su apoyo, consejos y en los momentos más difíciles, me alentaron a seguir adelante, anhelando que siempre me preparara para enfrentarme a la vida.**

**Hoy se ven culminados nuestros esfuerzos y mis deseos, iniciando así una etapa más en mi vida. Deseo de todo corazón que mi triunfo como mujer y profesionista lo sientan como el suyo propio.**

**Por ello, a DIOS y a USTEDES,  
¡GRACIAS!**

## **DEDICATORIAS.**

A mis hermanas: EDITH MIREYA  
VILLANUEVA ESTRADA y MONICA  
VILLANUEVA ESTRADA, por estar  
siempre juntas en los buenos y malos  
momentos.

A mis abuelitos maternos ALICIA  
GARCÍA ISLAS y ENRIQUE ESTRADA  
SÁMANO

A mis abuelitos paternos: ESTHER  
GONZALEZ VAZQUEZ y RAMÓN  
VILLANUEVA PINEDA.

A EDUARDO A. VÁZQUEZ L., por su  
amor, apoyo, comprensión y por estar  
siempre a mi lado

A mis cuñados: MARIO CERVANTES y  
CARLOS FLORES por su amistad.

**A TODOS ¡MIL GRACIAS!**

*“Recibid mi enseñanza y no plata; y ciencia antes que el oro escogido.*

*Porque mejor es la sabiduría que las piedras preciosas;  
y todo cuanto se puede desear, no es de compararse con ella.*

*Yo, la sabiduría, habito con la cordura, y hallo la ciencia de los  
consejos”.*

Proverbios: capítulo 8, versículos 10-11.

## **ÍNDICE.**

	<b>Página</b>
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Área de estudio	14
4. Parte experimental	28
4.1 Trabajo de campo	
4.2 Trabajo de laboratorio	
A) Determinación de carbonatos.	
B) Pérdida por ignición	
C) Espectroscopia de Absorción Atómica.	
D) Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X.	
5. Análisis de resultados y discusión	44
6. Conclusiones	72
7. Apéndice	75
Apéndice 1 Métodos espectrofotométricos.	
Apéndice 2 Estadística	
Apéndice 3 Composición química de minerales.	
8 Bibliografía	96

## **ÍNDICE DE FIGURAS.**

	<b>Página</b>
<b>FIGURA 1.</b> Esquema idealizado del perfil de playa	<b>5</b>
<b>FIGURA 2.</b> Algunas clases químicas de minerales mas comunes	<b>8</b>
<b>FIGURA 3.</b> Localización del área de estudio	<b>18</b>
<b>FIGURA 4.</b> Vulcanismo en la parte Oeste del Golfo de California	<b>19</b>
<b>FIGURA 5.</b> Orografía de la península de Baja California	<b>20</b>
<b>FIGURA 6.</b> Rios principales del Este del Golfo de California	<b>23</b>
<b>FIGURA 7.</b> Sierra Madre Occidental	<b>25</b>
<b>FIGURA 8.</b> Muestreo en el litoral del Golfo de California	<b>30</b>
<b>FIGURA 9.</b> Calcímetro de Bernard	<b>32</b>
<b>FIGURA 10.</b> Provincias litológicas del Golfo de California	<b>54</b>
<b>FIGURA 11.</b> Principio de la medición espectrofotométrica	<b>78</b>

## ÍNDICE DE TABLAS.

	<b>Página</b>
<b>TABLA 1.</b> Elementos más abundantes de la corteza terrestre	7
<b>TABLA 2.</b> Porcentaje de flujo de descarga y sedimentación en diferentes áreas a lo largo de la costa oriental del Golfo de California	21
<b>TABLA 3.</b> Estandarización del método para determinar carbonatos	35
<b>TABLA 4.</b> Estandarización del método de pérdida por ignición	37
<b>TABLA 5.</b> Condiciones de trabajo para absorción atómica	39
<b>TABLA 6.</b> Exactitud de absorción atómica	39
<b>TABLA 7.</b> Precisión de absorción atómica	40
<b>TABLA 8.</b> Condiciones de operación del equipo de FRX	41
<b>TABLA 9.</b> Precisión de FRX	42
<b>TABLA 10.</b> Exactitud del método de FRX	43
<b>TABLA 11.</b> Composición química de la zona Este del Golfo de California	46
<b>TABLA 12.</b> Zona Este del Golfo de California Análisis de correlación	50
<b>TABLA 13.</b> Zona Este del Golfo de California Análisis de factores	52
<b>TABLA 14.</b> Provincias litológicas de la zona Este del Golfo de California	55
<b>TABLA 15.</b> Composición química de la zona Oeste del Golfo de California	59
<b>TABLA 16.</b> Zona Oeste del Golfo de California Análisis de correlación	64
<b>TABLA 17.</b> Zona Oeste del Golfo de California Análisis de factores	66
<b>TABLA 18.</b> Provincias litológicas de la zona Oeste del Golfo de California	68
<b>TABLA 19.</b> Criterios para seleccionar métodos analíticos	82
<b>TABLA 20.</b> Composición promedio de una roca ígnea	89
<b>TABLA 21.</b> Minerales óxidos	91
<b>TABLA 22.</b> Grupo de los feldespatos	92
<b>TABLA 23.</b> Grupo del anfíbol	94

# ***INTRODUCCIÓN***

## **INTRODUCCIÓN.**

La gran extensión del Golfo de California presenta un rasgo sobresaliente del país que implica la interacción de procesos geológicos a través del tiempo. La importancia de estudiar dicha área estriba en que es tectónicamente activa donde se llevan a cabo procesos geológicos, químicos, físicos y biológicos de gran interés científico.

El Golfo de California es una cuenca oceánica "joven" que inició su formación hace aproximadamente 5 millones de años y es uno de los más estudiados en el mundo. Schewartzlose y Hendrickson<sup>(1)</sup> reportan que ha habido más de 4 000 trabajos sobre el Golfo de California publicados durante este siglo.

Para conocer el origen y evolución del Golfo de California, es necesario analizar e interpretar la composición química de sedimentos y relacionarlos con información geológica y geográfica de la zona.

Se presenta un estudio de 54 muestras de sedimentos de playas ubicadas en el Golfo de California que comprende el litoral de los estados de Nayarit, Sonora, Sinaloa y Baja California, para su estudio se ha dividido en dos zonas, la zona Este y la zona Oeste del Golfo de California, ambas zonas tienen condiciones climáticas y geológicas particulares.

Los objetivos del presente trabajo que pertenece al proyecto de investigación titulado "Investigación Composicional sobre Arenas de Playas Mexicanas" (clave 3477T), apoyado por CONACYT son los siguientes:

- Determinar la composición química de los sedimentos localizados en el Golfo de California a través del estudio de elementos mayores (%) y elementos traza (ppm)
- Realizar un análisis de la asociación existente entre la composición química de los sedimentos litorales del Golfo de California con las características litológicas y geográficas de la región, que permita inferir su influencia en los sedimentos.

# ***ANTECEDENTES***

## **ANTECEDENTES.**

La playa como un medio natural, destaca por su importancia dentro de los ambientes geológicos costeros, tanto a nivel económico como en sentido estrictamente científico<sup>(2)</sup>

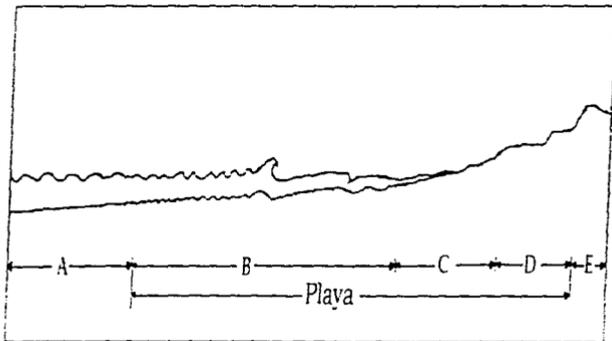
La playa esta en constante movimiento, cambiando lentamente su configuración a pesar de las grandes masas de arena que es necesario mover continuamente, grano a grano para variar su composición y posición. A pequeña escala y en cuestión de horas, los castillos de arena desaparecen y sus huellas son borradas, en una escala mayor, después de días o meses varía la altura de arena alrededor de las rocas, las olas rompen en nuevos lugares y la playa llega a ser mas ancha o más estrecha. Quizás en un periodo de años, grandes cantidades de arena pueden llegar a marcharse originando un sinnúmero de complejos problemas a las personas que quieren conservar la playa para seguir disfrutándola. Esta cualidad dinámica de las playas fue descrita por el geomorfoloogo Douglas W. Johnson, de la Universidad de Columbia, en la siguiente definición: *"Una playa es un depósito de materiales los cuales están, o bien en tránsito a lo largo de la costa o lo hacen a intervalos"*. Así pues, tres elementos vienen a constituir una playa: una cantidad de material rocoso, un área de línea de costa en la cual aquel se mueve y una fuente de energía para moverlo que sería la acción del oleaje<sup>(3)</sup>.

Otra definición mas practica de la playa dice que es un limite natural entre el aire, la tierra y agua, siendo el oleaje el que define el perfil de la playa. De acuerdo con Komar<sup>(4)</sup>, los geólogos emplean el término litoral para incluir la playa hacia la porción marina a una profundidad a la cual el sedimento es transportado menos activamente por las olas superficiales.

Las playas varían de un lugar a otro, pero se puede decir que todas tienen en común la existencia de un perfil, el cual puede presentar diferentes características según sean los procesos terrestres, acuáticos o atmosféricos que la afecten e incluye partes altas (expuestas al aire cuando el nivel de agua es bajo) y partes bajas (sumergidas todo el tiempo).

A continuación se describen las divisiones principales, así como los rasgos del perfil de la playa.

**FIGURA 1.** Esquema idealizado del perfil de la playa A) Plataforma continental, B) Infraplaza, C) Mesoplaza, D) Supraplaza, E) Dominio terrestre<sup>51</sup>



- A) La plataforma continental limita a la infraplaza hacia el mar. Cuando la plataforma continental es relativamente ancha, entonces la infraplaza tendería a ser de mayor longitud.
- B) La infraplaza es la zona de la playa que siempre está cubierta por agua en condiciones normales.
- C) La mesoplaza está localizada entre la infraplaza y la supraplaza. Se trata de una superficie inclinada que va hacia el mar y en la cual se tiene una zona de vaivén, donde ocurre el lavado y el relavado. La mesoplaza es la parte de la playa que está continuamente cubierta por el agua y expuesta al aire de una forma rítmica y alternada.

- D) La supraplaya es la zona de la playa que en condiciones normales se encuentra seca, en ella predominan los agentes eólicos sobre los acuosos, ya que el agua solo ocasionalmente llega a invadir esta zona, como en el caso de mareas por tormentas o por olas extremadamente altas.**
- E) El dominio terrestre es la zona que delimita a la supraplaya, y es por ello el límite hacia tierra de la playa.**

Las playas están constituidas de sedimentos, los cuales son una acumulación de partículas de roca suelta y están conformadas por dos componentes importantes: la fracción biogénica y la fracción terrígena.

La fracción biogénica o carbonatada está compuesta de conchas, residuos óseos y carbonatos minerales. Por definición las rocas y los sedimentos carbonatados son aquellos que tienen más del 50% de carbonatos<sup>[1]</sup>, los cuales están compuestos de carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y uno o más cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , etc.), siendo la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) la más común. Estos carbonatos minerales precipitan en las aguas saturadas de carbonatos por procesos químicos y bioquímicos, acumulándose en una gran variedad de formas, por ejemplo restos óseos, núcleos inorgánicos que se desarrollan en mares poco profundos, suelos áridos y como precipitados en paredes de cuevas calizas. En el caso de las playas el origen de esta fracción es principalmente marino y son depositados en las playas a través de corrientes y oleajes.

La fracción terrígena es la componente más frecuente en muchas playas, y está formada por material procedente de rocas continentales debido a la erosión y transporte<sup>[2]</sup>. Carranza-Edwards, et al<sup>[3]</sup>, por ejemplo, encontraron en algunas muestras de sedimentos litorales de Sonora que la fracción terrígena está compuesta principalmente por feldsarenitas y arenas líticas.

La corteza terrestre está compuesta por unidades simples llamadas minerales. Un mineral es un compuesto o elemento sólido que se presenta naturalmente. Tienen una composición definida y un arreglo interno ordenado de los átomos, iones o moléculas, conocido como estructuras cristalinas, lo que conforma las propiedades físicas y químicas únicas, incluyendo la tendencia a adoptar ciertas formas geométricas llamadas cristales<sup>[4]</sup>.

Los minerales se formaron al enfriarse la tierra a partir de una masa fundida. Los elementos se agruparon de tal forma que al enfriarse constituyeron su estructura cristalina o arreglo ordenado de sus átomos. Se sabe que en la naturaleza existen más de 2,000 tipos de minerales. Más del 99% de la corteza terrestre está compuesta de 15 elementos abundantes.

**TABLA 1. Elementos más abundantes de la corteza terrestre**

Óxido	% *	Elemento	ppm **
SiO <sub>2</sub>	61.9	Bario (Ba)	425
TiO <sub>2</sub>	0.8	Estroncio (Sr)	375
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.6	Zirconio (Zr)	165
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.47	Cobre (Cu)	55
MnO	0.1	Escandio (Sc)	22
MgO	3.1	Plomo (Pb)	12.5
CaO	5.7	Uranio (U)	2.7
Na <sub>2</sub> O <sup>a</sup>	3.1	Mercurio (Hg)	0.08
K <sub>2</sub> O <sup>a</sup>	2.9	Plata (Ag)	0.07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>a</sup>	0.3	Oro (Au)	0.004

\*Promedio del contenido de elementos mayores

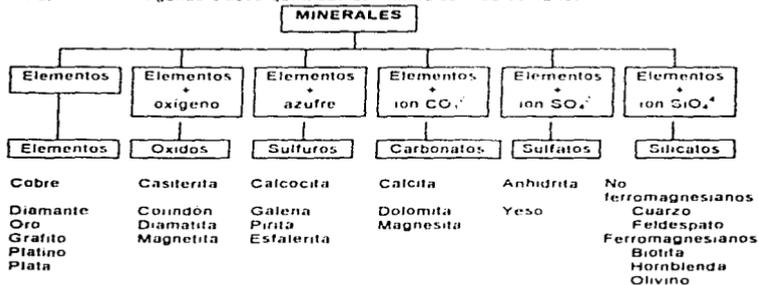
\*\* Promedio del contenido de algunos elementos traza

Los minerales formadores de rocas se agrupan dentro de familias, cada una con muchas especies. Una familia mineral es aquella cuyo arreglo estructural general de átomos es fijo y la sustitución de un átomo por otro de similar tamaño, varía la composición química y produce pequeñas diferencias en todas sus propiedades físicas<sup>19</sup>; (apéndice 3)

<sup>a</sup> Se reportan como óxido de sodio, potasio y fósforo, pero no existen como tal, sino como silicatos, carbonatos, etc

El método de clasificación más usado para el estudio de los minerales es aquel que agrupa a los minerales principalmente de acuerdo a una composición química similar (fig. 2).

FIGURA 2. Algunas clases químicas de minerales más comunes <sup>(10)</sup>



La agrupación de minerales da lugar a la formación de rocas. Por definición, las rocas están constituidas por cualquier sustancia sólida de cierta dureza, inorgánica u orgánica de origen natural, constituyendo la mayor parte de la corteza terrestre, por ejemplo el granito esta formado de cuarzo, feldespatos y otros minerales.

Las rocas son alteradas o intemperizadas por procesos físicos o mecánicos (intemperismo físico) o por procesos químicos (intemperismo químico). Ambos operan simultáneamente, aunque uno u otro predomina dependiendo de la naturaleza de la roca y el clima en particular, dando lugar a partículas de roca suelta las cuales son transportadas y acumuladas formando los sedimentos.

**INTEMPERISMO FÍSICO O MECÁNICO<sup>(11)</sup>**. El intemperismo físico resulta de la alteración de la roca por varias fuerzas que proceden sin alterar la composición química del material.

- Influencia del clima, las rocas se dilatan cuando son expuestas al calor y se contraen cuando son enfriadas, aunque en un grado mucho menor en relación con otras sustancias. La

repetición diaria y estacional de este proceso a través de los años causa que se desarrollen grietas que permiten la entrada de la humedad y el comienzo de la aparición de plantas, las cuales son mucho más efectivas como agentes del intemperismo que los cambios reales en el volumen de la roca

- Acción de las heladas: el rocío, la lluvia y la nieve se filtran en las grietas y poros de las rocas cerca de la superficie de la tierra. Cuando se congela, el agua ejerce una presión de varios cientos de kilogramos por centímetro cuadrado. Este es un mecanismo poderoso que destruye las rocas porosas agrietadas y debilitadas
- Exfoliación: la dilatación y contracción alternantes efectuadas en la parte exterior de un cuerpo de roca, junto con el congelamiento y el deshielo causan el desmenuzamiento de escamas, proceso conocido con el nombre de exfoliación
- Plantas y animales: las raíces de los árboles también ejercen presiones sobre las grietas, aun las pequeñas plantas son efectivas en el intemperismo. Los animales que pisan con fuerza la tierra o que se revuelven excavando, ayudan a la destrucción mecánica de las rocas

Otros factores importantes para el proceso de intemperismo físico son el movimiento de los vientos, de las aguas oceánicas y la precipitación

El intemperismo no actúa de forma aislada, sino como hemos visto anteriormente, participan otros factores muy importantes cuyo objetivo final es el de atacar a las rocas. El intemperismo ataca a las rocas expuestas, y las partículas que quedan son deslavadas o arrastradas por la lluvia o transportadas por el viento donde los agentes del intemperismo siguen desintegrándose al mismo tiempo que la fuerza de gravedad los empuja pendiente abajo. Sobre las superficies de pendiente moderada el intemperismo actúa hasta acumular un espesor considerable de suelo, pero en cuanto se forma, empieza a moverse, fluir o deslizarse hacia niveles inferiores. El paso continuo del agua a través de los suelos los despoja de materiales solubles. Por tanto, el intemperismo y el desplazamiento de material rocoso actúan conjuntamente



• **Hidratación:** el agua pura disuelve la sal común y algunos otros minerales, pero no es un disolvente efectivo para cualquiera de las rocas comunes. La calcita,  $\text{CaCO}_3$  ( $\text{p}K_s=8.22$  a  $25^\circ\text{C}$ ), el principal mineral de la caliza ordinaria, es ligeramente soluble en agua pura. Sin embargo casi toda el agua que se introduce en las cavidades de las rocas lleva algo de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), tomado parcialmente del aire, pero en mayor abundancia de las plantas en descomposición, y así dotado el ambiente con ácido carbónico, hay una aceleración notable de la disolución de la calcita.

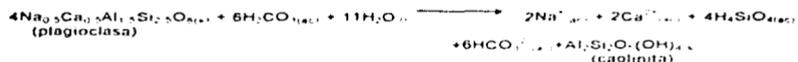
La solubilidad de cualquier roca depende de su composición química y de la naturaleza de los fluidos con los que se pone en contacto.

El tamaño de las partículas de roca es un factor extremadamente importante en el intemperismo químico, dado que las sustancias pueden reaccionar químicamente sólo cuando se ponen en contacto unas con otras. Cuanto más grande es la superficie de una partícula, más vulnerable resulta al ataque químico. Por ejemplo, si tomamos un guijarro (volumen mayor que el de una esfera de 64 mm de diámetro y menor que el de una esfera de 256 mm de diámetro) y lo molemos, hasta convertirlo en polvo fino, el área total expuesta aumenta enormemente, y como consecuencia los minerales se intemperizan con mayor rapidez.

La velocidad de intemperismo químico está afectado por otros factores como por ejemplo, la composición del mineral original. El intemperismo químico afecta al cuarzo muy lentamente, ya que es un mineral estable. Cuando una roca como el granito, que tiene un alto porcentaje de cuarzo (óxido de silicio), se descompone, deja tras de sí una gran cantidad de cuarzo inalterado.

Una medida del intemperismo químico es el índice químico de alteración (IQA). En los procesos químicos provocados por el intemperismo, se alteran uno o más de los minerales que forman las rocas. El procedimiento para identificar la pérdida (o ganancia) de elementos, como resultado del intemperismo, se basa en el hecho de que los iones como  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^{+}$  (junto con  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{O}^{2-}$ ) forman feldspatos y plagioclasas, minerales fundamentales de las rocas ígneas que se alteran, provocando la disminución en la concentración de estos elementos, de los cuales el  $\text{Al}^{3+}$  es uno de los iones más resistentes durante el intemperismo debido a la baja

solubilidad del  $Al_2O_3$  en un intervalo de pH de 5 a 8, intervalo en el que ocurre la mayoría de los procesos geoquímicos en la superficie terrestre<sup>(12)</sup>. Un ejemplo común del intemperismo de una plagioclasa<sup>(13)</sup> es:



Nesbitt y Young<sup>(14)</sup> definieron el índice químico de alteración por

$$IQA = I(X) * \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + NaO + K_2O} \quad (1)$$

El IQA ha sido utilizado por Rosales-Hoz y Carranza-Edwards<sup>(15)</sup> en un estudio de sedimentos de playas mexicanas

Como podemos observar, sabiendo la composición química cuantitativa de los sedimentos y evaluando el intemperismo químico podemos conocer el estado de intemperización que ha sufrido la roca en su viaje desde el lugar de origen a la playa para convertirse en sedimento

Por ejemplo, estudios de intemperismo en rocas graníticas muestran que el calcio y sodio son algunos de los primeros elementos que se pierden con el intemperismo, el potasio es ejemplo de elemento movilizado durante los estados intermedios y finales del proceso del intemperismo y mientras que litio, cobre, manganeso y zinc son algunos elementos que permanecen en los fragmentos de roca residuales

Entonces, los minerales que se espera encontrar en la playa deben ser resistentes a procesos químicos y mecánicos. Las micas, los feldespatos, silicatos y cuarzos forman el material que se encuentra en muchas playas, así como también cantidades considerables de magnetita, ilmenita y zirconio. Los menos comunes o en concentraciones más pequeñas son oro, diamante, wolframita y platino. Todos estos minerales podrían ser clasificados como minerales pesados y son resistentes al intemperismo

Cabe mencionar que existe un gran laboratorio de la naturaleza, en donde gracias al intemperismo se van formando nuevas especies químicas que dependiendo del origen de la roca madre y por causa del deslizamiento, van viajando de su lugar de origen a otro más estable.

Por tanto, conociendo la composición química del sedimento que se encuentra en la playa y conociendo los factores climáticos, mineralógicos y geográficos del lugar, podemos deducir el origen de éste sedimento.

***ÁREA DE ESTUDIO***

## **ÁREA DE ESTUDIO.**

El área de estudio se enfoca al Golfo de California, que también se le llama Mar de Cortés o como antiguamente se le denominaba, Mar de Bermejo, comprende los estados de Sonora, Sinaloa, Nayarit, por la parte Este del Golfo de California, y por la parte Oeste, la península de Baja California (figura 3)

El origen del Golfo de California se explica con base en la teoría de las placas tectónicas, cuya idea principal supone que la corteza de la tierra está dividida en grandes placas delgadas y que se mueven con lentitud cambiando de tamaño, y la deriva continental argumenta que hace 200 millones de años existía un sólo continente llamado PANGEA y por el movimiento de placas, se separó para formar los continentes que hoy conocemos. Sin embargo, hoy en día se desconoce el mecanismo exacto de la transición de la península de Baja California. Lo más aceptable y comprobable es que el conjunto de la tierra mexicana se separó paulatinamente unos 260 km hacia el Noroeste del conjunto de la península por el desplazamiento de la falla de San Andrés.

Uno de los aspectos más importantes a considerar, está representado por los sedimentos, mediante su estudio se puede conocer la historia evolutiva del Golfo de California así como el ambiente que rodeaba a esta desde su creación. Los sedimentos depositados en este litoral son de origen orgánico e inorgánico, los primeros constituidos por organismos y los de origen inorgánico han sido el producto de la erosión de las rocas que afloraron en las dos márgenes costeras. La intensidad de la erosión y deposición en ambas márgenes es diferente, dominando la deposición o construcción en las costas de Sonora, Sinaloa y Nayarit, por lo que la margen presenta costas más extensas de pendientes suaves y con predominio de arenas, desde granos gruesos hasta muy finos, mientras que en la margen costera de la península, la erosión ha sido más común y destructiva, debido a la carencia de sistemas fluviales permanentes que depositen sedimentos a lo largo de la costa rocosa y escarpada.

Se describirán las características del Golfo de California en dos zonas, la zona Este del Golfo de California (Sonora, Sinaloa y Nayarit) y la zona Oeste (península de Baja California)



FIGURA 3. Localización del área de estudio.

## **ZONA OESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA.**

**CLIMA** En general toda la península es más bien árida. Dentro del proceso de dispersión de los sedimentos, la lluvia y los escurrimientos, juegan un papel importante. La precipitación en la península no excede de 250 mm/ anuales y los cursos del agua son efímeros. Carranza-Edwards, et al.<sup>(11)</sup> encuentran que en el Golfo de California existen sitios propicios para la precipitación de carbonatos cuando las condiciones climáticas son áridas y el aporte terrígeno escaso o nulo.

**LITOLOGÍA** Dos tipos de rocas ocurren en la parte este de la península de Baja California como fuente de sedimentos, ígneas y metamórficas, en el norte y en algunas partes del sur existen rocas plutónicas. Se localizan dos formas de batolitos (roca plutónica que aumenta de tamaño hacia abajo, cuyo fondo no se puede determinar), las cuales están separadas por dos capas gruesas de lava, con brechas volcánicas, tobas (ceniza volcánica consolidada) y sedimentos continentales asociados, anteriores a la apertura del Golfo de California. En toda el área de la península son característicos los antiboques con cantidades mínimas de apatita, derivados de los batolitos ya mencionados, también existen piroxenos con proporciones variadas de augita, hornblenda basáltica y olivino. El vulcanismo está representado por tres grandes áreas de Baja California: San Borja, Tres Virgenes y Jaraguay<sup>(12)</sup> (figura 4), los cuales han estado activos durante los últimos 10 000 millones de años.

**OROGRAFÍA** Respecto a la orografía de la parte oeste del Golfo de California, en el interior de la península de Baja California se encuentra la provincia llamada Sierra de Baja California, que ocupa 1,000 Km<sup>2</sup> o casi toda su longitud. Tiene una anchura media de 60 Km. La provincia es continua y es llamada Provincia Bajacaliforniana del Sistema montañoso del Pacífico, la cual es la gran área granítica, se caracteriza por que está limitada por el oriente por un descenso rápido y una ancha elevación con un suave declive hacia el oeste.

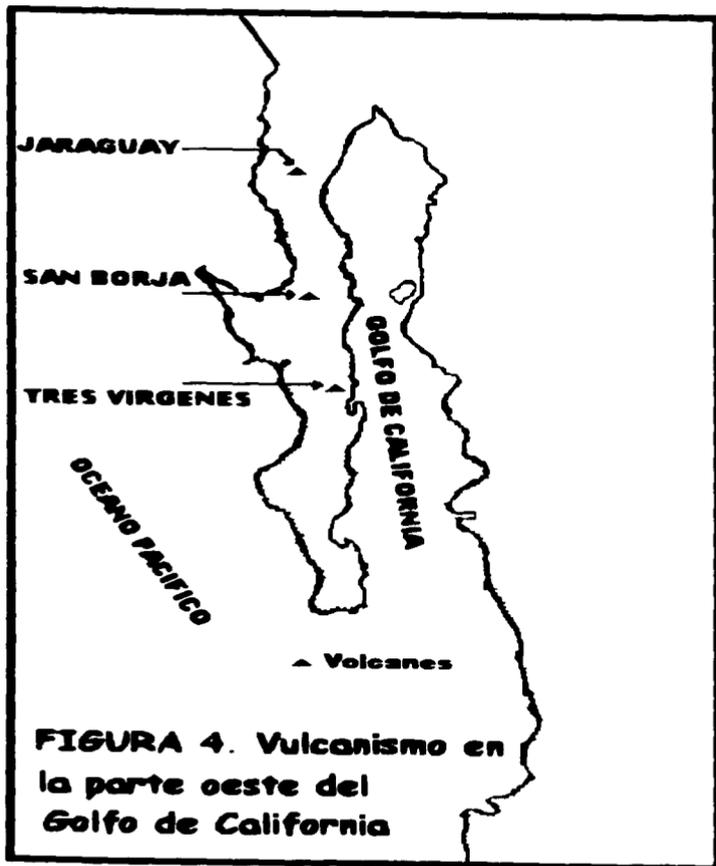
La península de Baja California ha sido considerada<sup>(17)</sup> a veces como una división fisiográfica o provincia, y dividida en subprovincias, cada una de las cuales comprende áreas altas y bajas. La Sierra de Baja California comprende tres subprovincias.

1. Parte norte. Se extiende a una distancia de 550 Km. desde la frontera internacional hasta la Bahía de San Sebastián Vizcaino. Comprende una alta y escabrosa meseta que culmina en una línea de sierras escarpadas que descienden en precipicios del lado del Golfo de California, con un declive más suave hacia el Pacífico. Las más altas de las sierras, cuyas cimas alcanzan de 2,000 a 3,000 metros de altura son la Sierra de Juárez y la Sierra de San Pedro Mártir.

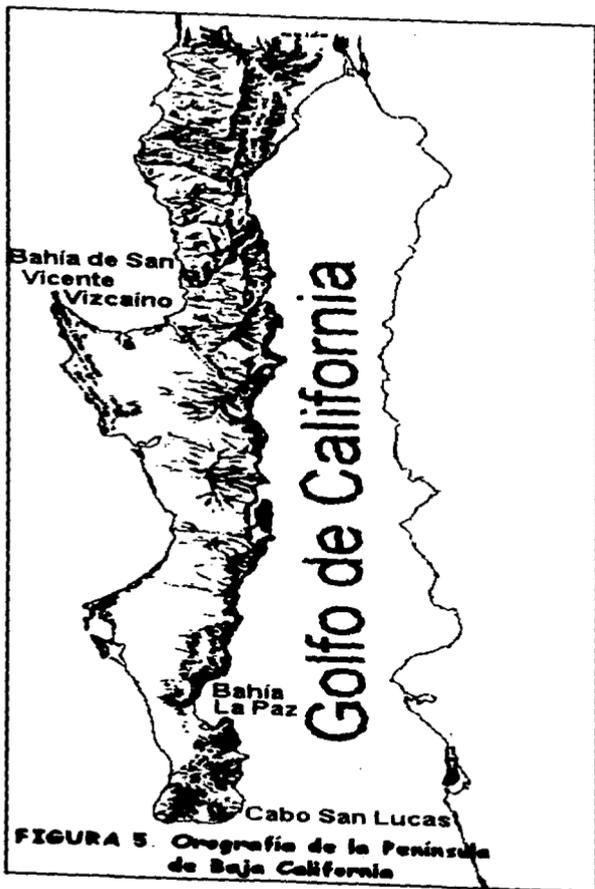
Hacia el sur de esta parte norte, las cadenas de la cima continúan en la Sierra de Calmaje y San Luis, Sierra de San Borja y Sierra de Cahaulti, las cuales son cadenas cortas, de entre 500 y 1,500 metros de altura que terminan abruptamente al borde de la llanura baja del Desierto de Vizcaino.

2 Área central. Se extiende desde el paso que conecta el Desierto de Vizcaino y la Bahía de San Rafael hasta donde se junta el Llano de la Magdalena y la Bahía de la Paz. Tiene 500 Kilómetros de largo y de 60 a 100 Kilómetros de ancho.

3 Parte sur. comprende la masa montañosa que se extiende desde la Bahía La Paz hasta el Cabo San Lucas. Mide 160 Km de largo y tiene una anchura de 80 Km. Consta de dos cadenas principales, la Sierra de la Victoria del lado del Pacífico con una altura máxima de 1,900 m. y la Sierra de la Trinidad del lado del Golfo, cuyo pico más alto tiene unos 900 m (figura 5).



**FIGURA 4. Vulcanismo en la parte oeste del Golfo de California**



## ZONA ESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA.

**CLIMA** El clima en la porción costera del estado de Sonora es definido como muy seco o desértico con régimen de lluvias en verano, siendo la precipitación media anual menor que 200 mm y la temperatura media anual de 22°C En la parte norte del estado de Sinaloa el clima es seco con una precipitación anual de 311 mm y una temperatura media anual de 25°C. En la parte de Nayarit el clima es cálido subhúmedo con una precipitación anual de 800-1000 mm y una temperatura media anual de 25°C

**RIOS** Las descargas del río Colorado son las de mayor aporte de sedimentos (tabla 2), los cuales están compuestos por 75% de materiales ígneos y 15% sedimentarios<sup>(20)</sup>

**TABLA 2.** Porcentaje de flujo de descarga y sedimentos en diferentes áreas de drenaje a lo largo de la costa oriental del Golfo de California durante el periodo de 1911-1935.

Área de drenaje	%total del área de drenaje	Flujo anual (millones de m <sup>3</sup> )	Estimación anual de cargas de sedimentos (toneladas)
Río Colorado 1911-1935	68	17 985	161 000 000
1935-1951	---	8 077	15 000 000
Río Concepción	7	742	7 422 894
Río Sonora	4	770	7 703 003
Río Yaqui	6	2 666	26 670 397
Río Mayo	2	829	8 293 333
Río Fuerte	3	4 707	47 088 357
Río Sinaloa	2	1 659	16 596 470
Río Culiacán	2	3 833	33 843 194
Río San Lorenzo	3	4 728	47 298 439
Descargas en Baja California	3	---	---
Periodo 1911-1935 totales	100	37 469	374 836 987

Los minerales predominantes en las descargas de los ríos son los piroxenos, anfíboles y epidotas. Se distinguen tres grandes series por su composición y grado de asociación en la zona costera, principalmente de minerales pesados<sup>(21)</sup> (figura 6)

1. Serie de Concepción, situada entre Puerto Peñasco y Cabo Lobos, es drenada por el río Concepción. La influencia de las corrientes sobre las descargas sedimentarias, tienden durante todo el año a dispersar el material hacia el norte. Esta serie está caracterizada por

sedimentos con alta concentración de epidota y menos del 10% son minerales volcánicos/ígneos. La relación epidota/anfiboles es 2:1.

2. Serie de los ríos San Lorenzo, Piaxtla y Presidio, esta representada por anfíboles, los cuales derivan de batolitos locales con características similares a los anfíboles de la península, debido a la continuidad litológica anterior a la formación del Golfo.

3. Serie del río Santiago. Algunos ríos de la costa Sur de Sonora y Sinaloa están caracterizados por series mineralógicas mezcladas entre materiales volcánicas-plutónicas y metamórficos, como sucede en las cargas sedimentarias de los Ríos Yaqui, Mayo y Fuerte.

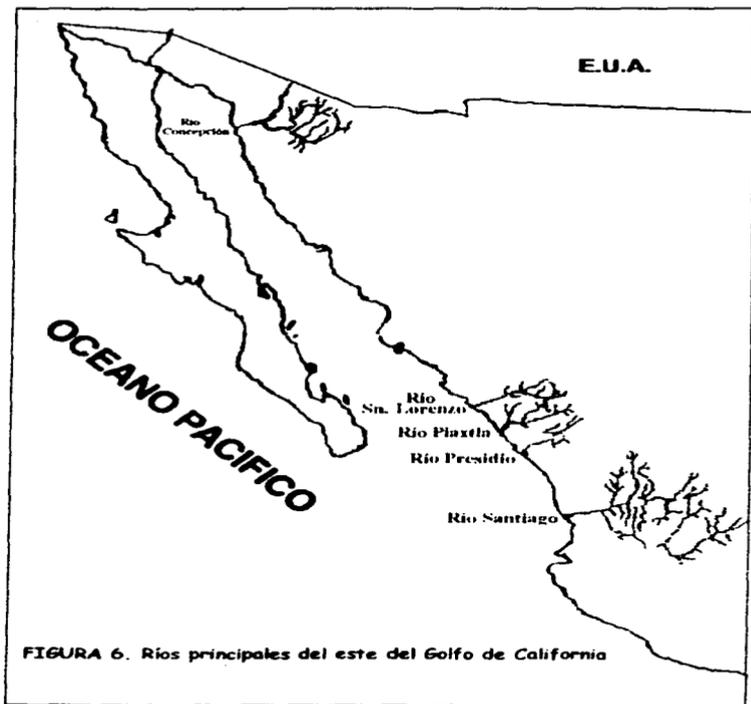


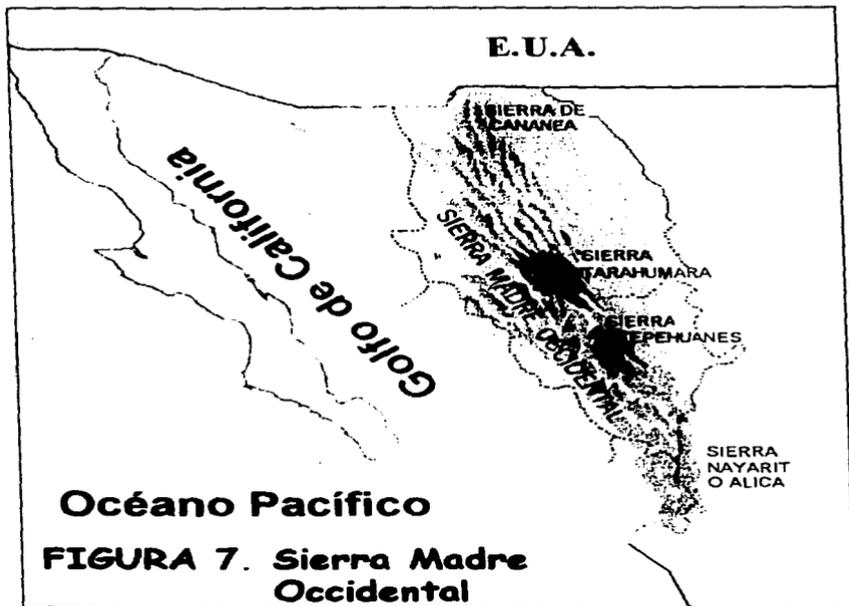
FIGURA 6. Rios principales del este del Golfo de California

**OROGRAFIA.** La parte Este del Golfo de California pertenece a tres provincias fisiográficas, las cuales son la zona desértica de Sonora, llanura costera de Sinaloa y Sierra Madre Occidental<sup>(2)</sup> (figura 7).

A) Zona Desértica de Sonora: esta zona está formada por amplias llanuras costeras que hacia el continente se ven interrumpidas bruscamente por numerosas sierras con una orientación general NNW-SSE y que están constituidas por rocas metamórficas, volcánicas, lúlitas y calizas.

B) Llanura Costera de Sinaloa, esta llanura comienza en Mazatlán, donde es bastante estrecha y continúa hacia el norte ensanchándose hasta alcanzar su mayor amplitud a la altura de Los Mochis. En esta provincia afloran rocas de tipo metamórficas que incluyen los gneises, esquistos y cuarcitas. También hay afloramientos de rocas clásticas y rocas intrusivas y extrusivas.

C) Sierra Madre Occidental<sup>(2)</sup> Constituye una enorme masa montañosa interrumpida por cañones labrados por los ríos. Se extiende desde la frontera norte, atravesando Sonora, Chihuahua, Sinaloa y Durango, hasta tocar la parte sur de Nayarit (Sierra Nayarit o Alica). Se une luego a la cordillera Neovolcánica, continuando hasta tocar el Pico de Orizaba y Cofre de Perote. Alcanza su máxima anchura y altitud hacia la parte media, en tanto que se angosta hacia el norte y el sur. Son muchos los nombres que se les da en las distintas localidades: Cananea o Sierra del Cobre, es una extensión del norte de Sonora y es de poca elevación; Tarahumara, se encuentra en el sur de Chihuahua y en la porciones inmediatas de Sonora y Sinaloa, forma la parte de la zona más abrupta y elevada; Tepehuanes, en Durango y una pequeña extensión de Sinaloa y Alica o Nayarit, que se encuentra en el estado de Nayarit. A la Sierra Madre Occidental, la forman casi en toda en su extensión rocas ígneas volcánicas e intrusivas con exposiciones de metamórficas.



## **TIPOS DE COSTAS EN EL GOLFO DE CALIFORNIA.**

En las costas del Golfo de California, los rasgos topográficos costeros no han sido desgastados por los agentes erosivos, como es el caso del Pacífico Tropical Mexicano, incluso la costa oeste del Golfo donde los fenómenos tectónicos prosiguen, sólo el vulcanismo regional, oleaje y viento han modelado el paisaje. Estas costas presentan poco cambio desde el momento de su apertura. Para la costa este del Golfo debido a la presencia de corrientes fluviales y a una mayor precipitación, están más desgastadas y los procesos costeros han sido más intensos, esto se hace más evidente en la porción Sureste del Golfo, mientras que para el Golfo superior, los cambios morfológicos notables han sido provocados por las descargas del Río Colorado, el cual ha drenado hacia el Océano Pacífico desde finales del Mioceno.

De acuerdo a la clasificación de las costas mexicanas propuesta por Carranza-Edwards, *et al*<sup>(23)</sup>, el Golfo queda incluido dentro de las unidades morfotectónicas VI y VII. La zona que corresponde a la unidad VI comprende el litoral peninsular del Golfo que tiene una extensión aproximada de 1,250 Km. Presenta una secuencia casi completa de costas rocosas, sólo interrumpidas en el área de San Felipe, Bahía Concepción y La Paz por costas arenosas. Como rasgo principal esta unidad se asocia a una plataforma continental muy estrecha. En la parte Norte de la península abundan las rocas de tipo plutónicas, volcánicas y metamórficas, en la parte sur, predominan las rocas de tipo plutónicas y volcánicas.

La unidad morfotectónica VII comprende el litoral continental de los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit, con una extensión aproximada de 1,450 Km. Presenta una gran variedad de ambientes costeros. También presenta en la parte Norte sedimentos del Río Colorado, con una prolongación de la plataforma sin pendientes pronunciadas. El límite occidental de esta unidad está controlado por un patrón de fallas en bloque que derivan hacia NO-SE, pertenecientes al sistema de la falla de San Andrés.

Las rocas asociadas son muy variables en composición, en la zona norte predominan las rocas plutónicas y metamórficas, y en la parte sur (Sinaloa y Nayarit), abundan las rocas volcánicas.

Los carbonatos provenientes de organismos son un constituyente importante en todas las playas. En el lado Oeste del Golfo de California hay una contribución importante en la parte central y sur de la península. La cantidad de carbonatos comúnmente excede de 25%. En la parte Este del Golfo de California, la abundancia de carbonatos es mucho menor, existiendo predominantemente en el norte donde hay áreas de depositación activa del 5 al 10%<sup>(2)</sup>.

***PARTE EXPERIMENTAL***

## **PARTE EXPERIMENTAL.**

### **4.1 Trabajo de campo.**

Para la toma de muestra de sedimento, se tomó una porción de la superficie de la playa, observando que se encontrara libre de actividades antropogénicas, es decir actividades ya sea recreativas, donde trabajen los pescadores, etc.

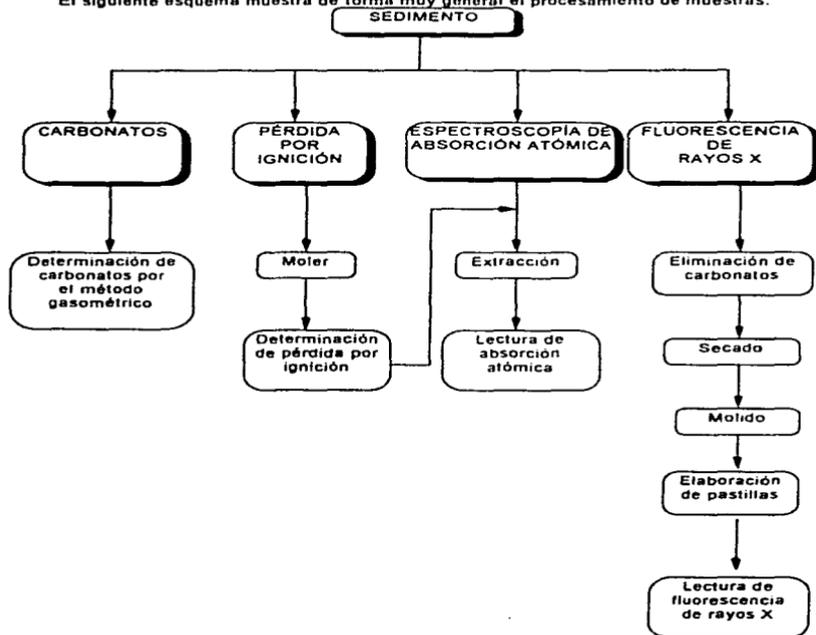
Las muestras se recolectaron de la parte de la mesoplaya (figura 1), usando una cuchara de plástico (para evitar contaminación de metales) en el primer centímetro de la superficie de arena. El material se guardó en bolsas de plástico para su posterior análisis.

Se tomaron 54 muestras en total del Golfo de California, que comprenden los estados de Sonora, Sinaloa, Nayarit y Baja California, como se observa en la figura 8.



#### 4.2 Trabajo de laboratorio.

El siguiente esquema muestra de forma muy general el procesamiento de muestras.



#### A) Determinación de carbonatos.

Se basa en la cuantificación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) desprendido al hacer reaccionar los carbonatos presentes en la muestra con ácido clorhídrico (HCl). La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:



La determinación se realiza en un calcimetro de Bernard (figura No 9), el cual consiste en una columna de vidrio graduada que contiene una solución de cloruro de sodio (NaCl) saturada que servirá para nivelar la columna y que está unida en la parte inferior a una burbuja de vidrio por medio de una manguera de hule látex. Por otra parte, la bureta también se encuentra conectada por la parte superior a un matraz erlenmeyer de 500 mL graduado, por medio de una manguera látex. Este matraz erlenmeyer contiene aproximadamente 0.1 g de muestra (es donde se lleva a cabo la reacción) y está tapado con un tapón de hule, el cual tiene dos perforaciones, uno está unido a la columna de vidrio y permite el desplazamiento del  $\text{CO}_2$  generado y la otra perforación es una entrada para una bureta con HCl al 50%

Figura 9. Calcimetro de Bernard



- 1) Es el matraz de reacción donde se coloca la muestra
- 2) Bureta con que se adiciona el volumen de HCl 1 l al sistema cerrado
- 3) Columna graduada con que se mide el  $\text{CO}_2$  generado al matraz al agregar HCl que desplaza la solución saturada de NaCl.
- 4) Burbuja de NaCl que sirve para nivelar la solución de cloruro de sodio con la columna graduada y así tomar la lectura del volumen de  $\text{CO}_2$  desplazado.

El procedimiento para la determinación de carbonatos es el siguiente:

1. Verificar que no haya fugas en el sistema
2. Llenar la columna graduada con solución de NaCl saturada, nivelando a cero con la burbuja de vidrio, ayudándonos con una tarjeta blanca
3. Colocar en la bureta HCl al 50%,

4. Pesar en un matraz erlenmeyer por duplicado 0.1 g de sedimento (la cantidad de muestra está en función de la concentración de carbonatos)
5. Insertar el matraz en el sistema, lo que originará un desplazamiento en la columna por vacío; bajar la burbuja de vidrio y nivelar con la columna (anotar como volumen  $V_2$ ); subir la burbuja a su posición original
6. Adicionar al matraz HCl al 50%

Para los cálculos, es necesario considerar la presión y temperatura en el sistema al equilibrar la columna con la presión atmosférica, para lo cual se introduce un factor determinado por la ecuación de Berthelot<sup>(24)</sup> (gases reales)

$$v^3 - (b+RT/P)v^2 + (a/PT)v - ab/PT = 0 \quad (2)$$

donde el valor de las variables es

$a = 3.61 \text{ atm} \cdot \text{K} / \text{L}$  (constante positiva aproximadamente proporcional a la energía de vaporización del líquido)

$b = 0.429 \text{ atm} \cdot \text{L} / \text{mol}$  (medida aproximadamente comparable al volumen molar del líquido o sólido).

$P = 0.769 \text{ atm}$  (Presión atmosférica en la Ciudad de México)

$T = 292.15 \text{ }^\circ\text{K}$  (temperatura ambiental de la Ciudad de México)

$R = 0.082 \text{ L} \cdot \text{atm} / \text{K} \cdot \text{mol}$  (Constante del gas ideal)

Resolviendo la ecuación de tercer grado obtenemos el valor del volumen:

$$V = 31.1949 \text{ mL}$$

Para simplificar los cálculos, podemos obtener este volumen usando la fórmula para el gas ideal ( $PV=nRT$ ):

$$\frac{nRT}{P} = \frac{(9.991 \times 10^{-4}) \text{ mol} (0.082 \text{ L} \cdot \text{atm} / \text{mol} \cdot \text{K}) (292.15 \text{ K})}{0.769 \text{ atm}} = 0.0312 \text{ L}$$

$$V = 0.0312 \text{ L} = 31.12 \text{ mL}$$

Y la diferencia del volumen usando las dos ecuaciones no es muy grande, por tanto, se puede utilizar cualquiera de las dos ecuaciones

Ahora necesitamos saber cuánto desplazará 0.1 g de una muestra formada únicamente por  $\text{CaCO}_3$  puro. Considerar que el peso molecular del  $\text{CaCO}_3$  es 100.09 g/mol

$$\frac{(0.1 \text{ g})(1 \text{ mol})}{100.09 \text{ g}} = 9.991 \times 10^{-4} \text{ moles de } \text{CaCO}_3$$

Entonces de 0.1 g de  $\text{CaCO}_3$  puro, tiene  $9.991 \times 10^{-4}$  moles y desplazará un volumen de 31.1949 mL. De esta manera para calcular el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  en una muestra con el volumen desplazado, al considerar que el volumen desplazado de 0.1 g de  $\text{CaCO}_3$  representa el 100% y que el volumen desplazado de  $\text{CO}_2$  es 1 mL

$$\frac{[\text{Volumen } (\text{CO}_2)] [100\%]}{31.1949 \text{ mL}} = \text{Factor}$$

$$\frac{(1 \text{ mL}) [100\%]}{31.1949 \text{ mL}} = 3.21 \text{ mL} \cdot \text{Factor}$$

Una vez obtenido el factor "F", el porcentaje de carbonatos en las muestras se calcula de la siguiente forma:

$$\% \text{CO}_2 = [(V_1 - V_2) \cdot \text{mL de HCl adicionados}] \times \text{Factor}$$

donde  $V_1$  = volumen desplazado al embonar el matraz al sistema

$V_2$  = volumen de  $\text{CO}_2$  formado al adicionar HCl

Hay que considerar que la cantidad de muestra que se pese debe estar en función de los carbonatos que tenga el sedimento. Si sabemos que una muestra tiene poca cantidad de carbonatos, pesamos entre 1 a 2 g para poder detectar con precisión los carbonatos. Ahora, si en la muestra se encuentran presentes muchos carbonatos, pesamos 0.1 g para llevar a cabo la determinación.

La presión y temperatura deberá medirse cada vez que se realice una determinación

¿Cómo se va a saber el volumen de HCl 50% que hay que adicionar para disolver todo el carbonato y asegurarnos que el  $\text{CO}_2$  formado corresponde al carbonato total? La forma como se hace es: determinar el volumen desplazado en matraces vacíos agregando 10 mL de HCl, de la misma forma que si pusiéramos muestra. Las medias de los valores obtenidos son:

$$V_1 = 4.42 \text{ mL}$$

$$V_2 = 18.18 \text{ mL}$$

$$V_2 - V_1 = 13.8 \text{ mL} = \text{volumen de HCl adicionados}$$

Y la fórmula utilizada en la determinación de carbonatos fue:

$$\% \text{CO}_2 = [(V_2 - V_1) \cdot 13.8 \text{ mL}] \times 3.21$$

• **Estandarización.**

Para obtener la exactitud y precisión, se utilizó como estándar una muestra de  $\text{CaCO}_3$  puro y seco a  $100^\circ\text{C}$  en la estufa por 1 día. Los resultados se muestran en la siguiente tabla

**TABLA 3.** Estandarización del método para determinar carbonatos

PESO DE MUESTRA	% $\text{CaCO}_3$
0.1020 g	101.39
0.1020 g	80.82
0.1037 g	94.32
0.1030 g	84.03
0.1008 g	90.46
0.1022 g	103.31
0.1024 g	90.46
0.1050 g	94.96
0.1083 g	83.39
Desviación estándar	7.86
Intervalo de confianza al 99% (n=9)	+8.79
Coefficiente de variancia	8.6%
Media	91.46
Error relativo	-8.54%

**B) Pérdida por ignición.**

La pérdida por ignición determina la cantidad de materia orgánica en los sedimentos, la cual se determina por la medición de la pérdida de peso de la muestra después de realizar la combustión del material orgánico<sup>(25)</sup>. La forma de trabajo para pérdida por ignición es

1. Moler aproximadamente 4 g de muestra de sedimento (tomar en cuenta que esta misma muestra se va a usar para digerir y leer metales traza) en un molino SPEX 8000

**MIXER/MILL** en un contenedor de forma cilíndrica de carburo de tungsteno (el material es para no contaminar las muestras con metales) durante 3 min

2. Talar los crisoles o cápsulas de porcelana en la mufla **MUFFLE FURNACE, ELECTRIC COMPANY**, a 550°C por 30 min hasta obtener un peso constante. Como este análisis es por diferencia de pesos, es importante tener este dato preciso

3. Poner en el crisol la muestra molida y colocar dicho crisol en la mufla para la eliminación de materia orgánica y agua a 550°C por 2 horas

4. Después de ese tiempo, pasar el crisol a un desecador hasta que se enfríe y pesar.

**NOTAS:** para evitar que haya una fluctuación variable en el peso de los crisoles tomar los crisoles con guantes de plástico y ponerlos inmediatamente en el desecador para que se enfríe evitando así que se modifique el peso por estar al aire libre

Para los cálculos, se explica un ejemplo

Promedio del peso de crisol vacío tarado 73 1428g

Muestra que se pesó para pérdida por ignición 3 9175g

Peso del crisol con muestra después de la pérdida por ignición 76 7668g

Restando el peso del crisol vacío tarado del peso del crisol después de haber hecho la pérdida por ignición, obtengo la muestra ya sin materia orgánica y sin agua

$$\text{MUESTRA CON PERDIDA POR IGNICIÓN} = 76\ 7668\ \text{g} - 73\ 1428\ \text{g} = 3\ 624\ \text{g}$$

El peso de muestra sin pérdida de ignición corresponde al 100%, haciendo una regla de tres obtenemos el valor de materia orgánica y agua que se eliminó

$$\begin{aligned} & 3\ 9175\ \text{g} - 100\% \\ & 3\ 624\ \text{g} - X \\ X &= \frac{3\ 624 \times 100}{3\ 9175} \cdot 100 \end{aligned}$$

Por tanto el valor de la materia orgánica y agua en este ejemplo es de 7.5%, y este valor se va a utilizar para sumar a 100% el valor de los metales mayores

- Estandarización.

Sólo se determinó la precisión del método con un subestándar, ya que no contamos con un estándar certificado para determinar la exactitud del método. El método de trabajo fue igual que para las muestras. Los resultados de la estandarización se muestran en la tabla 4.

TABLA 4. Estandarización del método de pérdida por ignición

MUESTRA	% PERDIDA DE IGNICIÓN
SONC4-1	1 514
SONC4-2	1 625
SONC4-3	1 245
SONC4-4	1 345
SONC4-5	1 503
Media	1 446
Intervalo de confianza al 99% (n=5)	±0 308
Desviación estándar	0 15
coeficiente de varianza	10 37

### C) ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.

- Extracción.

Como los metales se encuentran dentro de una estructura cristalina rígida y en forma sólida, necesitamos extraer los metales de tal estructura en un medio líquido. Para ello utilizamos un horno de microondas CEM MDS 2000 con una mezcla de ácidos.

Para conocer la mezcla de ácidos a usar, necesitamos saber qué tipo de muestra se analiza, es decir si son silicoaluminatos, minerales pesados, óxidos, carbonatos, etc. Los ácidos utilizados son:

Mezcla de  $\text{HNO}_3$ , HF, HCl y agua bidestilada se usa para extraer metales traza de silicoaluminatos tales como Ni, Cu, Cd, Zn, V, Sr, Cr, Mn y Ti.

Mezcla de  $\text{HNO}_3$ , HCl y agua bidestilada se usa para extraer metales de muestras carbonatadas como Ca, Mg, Sr, y Fe, ya que si usara HF (ácido débil,  $\text{p}K=3.2$ ) se precipitarían todos los carbonatos de tales metales y no los podría extraer.

Antes de empezar, se tiene que trabajar con el material lavado con  $\text{HNO}_3$  6N durante tres días, al término de dicho periodo enjuagar todo el material con agua bidestilada. Esto se realiza con el fin de evitar contaminación

Otra precaución a seguir cuando se digiera con HF es usar material de plástico, ya que es muy corrosivo con el vidrio

- 1 Pesar 0.5 g de muestra y vaciarla en una bomba de teflón
- 2 Adicionar los siguientes ácidos 4 mL de HF (omitir en caso de muestras carbonatadas), 2 mL de HCl, 5 mL de  $\text{HNO}_3$  y 10 mL de agua bidestilada.
- 3 Tapar herméticamente con su camisa de fibra de vidrio
- 4 Digerir en el horno de microondas en tres pasos las muestras bajo las siguientes condiciones

	PASO A	PASO B	PASO C
POTENCIA	100	100	100
PRESION (psi)	40	80	120
TIME (min)	30	30	30
TAP (min)	20	20	20

- 5 Después de pasar el tiempo de digestión y enfriar los vasos, vaciar el contenido de la bomba a matraces aforados de 25 mL NALGENE y aforar con agua bidestilada
- 6 Vaciar la muestra a un tubo para centrifugadora NALGENE y centrifugar a 80 rpm durante 5 min en el aparato DYNAC CENTRIFUGE
- 7 Decantar la muestra y vaciarla en un frasco de plástico limpio, etiquetar y guardar.

• **Lectura.**

Ya que tenemos las muestras digeridas, lo que sigue a continuación es preparar las condiciones de trabajo (Tabla 5) para leer cada elemento en el espectrofotómetro de absorción atómica de flama, marca VARIAN modelo SPECTRA AA del laboratorio de Química Marina y Contaminación del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología

**TABLA 5. Condiciones de trabajo para espectroscopia de Absorción Atómica.**

ELEMENTO	Limite de detección ppm	Longitud de onda (nm)	Flama	Abertura (nm)
Cd	0 006	228 8	A-A	0 5
Cr	0 0285	357 9	A-A	0 2
Cu	0 012	324 7	A-A	0 5
Mn	0 011	279 5	A-A	0 2
Ni	0 099	232 0	A-A	0 2
Sr	0 002	460 7	N-A	0 5
V	0 1389	318 5	N-A	0 2
Zn	0 005	213 9	A-A	1 0

N-A flama óxido nitroso-acetileno

A-A flama aire-acetileno

Para evaluar la exactitud del método, se determinó midiendo el error relativo (apéndice 2) del estándar certificado ANG-1, para lo cual se digirió dos veces la misma muestra. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 6.

**TABLA 6. Exactitud de espectroscopia de Absorción Atómica**

Elemento	Concentración reportada <sup>a</sup>	Concentración de laboratorio	Intervalo de confianza al 99%	Error relativo
Cr	50 ppm	43 22 ppm	+0 23	13 56%
Cu	19 ppm	14 87 ppm	+3 18	21 74%
Ni	35 ppm	34 75 ppm	+0 91	0 71%
Sr	76 ppm	49 58 ppm	+9 86	-34 8%
Zn	20 ppm	19 7 ppm	+1 66	-1 5%

Los resultados de la precisión se obtuvieron leyendo diez muestras iguales. Se eligió el subestándar SONC-4 para cada metal, para lo cual se digirió diez veces una misma muestra bajo las mismas condiciones. Los resultados se presentan en la tabla 7.

<sup>a</sup> El estándar ANG-1 no tenía concentración reportada de los elementos, Cd, V y Mn. Así mismo, tampoco tenía el intervalo de confianza.

**TABLA 7. Precisión de Absorción atómica**

ELEMENTO	Sensibilidad		Desviación estándar S	Media X	Coeficiente de variancia C.V.
	Concentración característica	Intervalo de concentración			
Cd	0 011 ppm	0 22-2 2 ppm	0 07	4 65	1 58%
Cr	0 055 ppm	1 1-11 ppm	0 23	13 94	1 68%
Cu	0 033 ppm	0 66-6 6 ppm	0 15	9 30	1 58%
Mn	0 022 ppm	0 44-4 4 ppm	7 00	484 76	1 50%
Ni	0 088 ppm	1 76-17 6 ppm	2 34	16 25	14 42%
Sr	0 044 ppm	0 88-8 8 ppm	34 34	262 60	13 08%
V	0 88 ppm	17 6-176 ppm	2 29	57 77	3 97%
Zn	0 0088 ppm	0 176-1 76 ppm	1 62	92 87	1 74%

**D) ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.**

• **Tratamiento preliminar.**

Los elementos leídos por fluorescencia de rayos X fueron los elementos mayores Al, Ti, Ca, Mg, Si, Fe, P y K. Para la lectura de los elementos mayores, las muestras deben estar libres de carbonatos, esto es con el fin de pesar una cantidad real de fracción terrígena y eliminando así la fracción biogénica de la muestra y físicamente la muestra debe estar en forma de pastilla, para lo cual el tratamiento preliminar que se siguió fue el siguiente:

1. Pesar aproximadamente 4 0 g de muestra sin moler
2. Eliminar los carbonatos agregando 10 mL de HCl 10% y agitar manualmente hasta que termine el desprendimiento de CO<sub>2</sub>.
3. Lavar la muestra con agua bidestilada hasta llegar a pH neutro (pH=7) usando una bomba de vacío.
4. Secar en estufa a 110°C por 4 horas
5. Moler la muestra en el molino SPEX 8000 MIXER/MILL durante 5 min
6. Pesar lo mas exacto, 1 0 g de muestra.

7. Pesar 9 ±0.001 g de tetraborato de litio (Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>), que se utiliza para disolver los óxidos básicos (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxidos de tierras raras y carbonatos
8. Pesar 0.2 g de nitrato de amonio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), se utiliza para oxidar el Fe(II)
9. Revolver homogéneamente todos los reactivos anteriores en un crisol de grafito
10. Agregar 4 gotas de ácido bromhídrico (HBr) para romper la tensión superficial
11. Calentar a 1150°C en la mufla por 15 min., cada 5 min. agitar 10 seg para eliminar burbujas y asegurarse que la pastilla quede homogénea
12. Después de los 15 min., poner el crisol de grafito en una plancha de calentamiento a 500°C y cubrir con tela de asbesto, esto es para evitar que la pastilla se rompa por los cambios bruscos de temperatura que pueda sufrir
13. Ya estando la pastilla fría, vaciamos la pastilla y la marcamos con un lápiz de punta de diamante.

Las pastillas se leyeron en la Administración Central de Laboratorio y Servicios Científicos de la Administración General de Aduanas de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público. El equipo usado fue el de dispersión de longitud de onda, de marca SIEMENS, modelo S303. Las muestras preparadas en pastillas se leyeron en los programas de cómputo TIAL y ELEMENTO. Las condiciones de operación del equipo de FRX usando Rh como blanco se presentan en la tabla No. 8.

**TABLA 8.** Condiciones de operación del equipo de FRX

Elemento	Cuento de impulsos eléctricos por segundo	Monocrominador (cristal)	Línea	Angulo (2 $\theta$ )	kV/mA
Al	8	PET	K $\alpha$ 1,2	143 298	30/40
Ca	8	LIF 100	K $\alpha$ 1,2	113 168	40/45
Fe	8	PET	K $\alpha$ 1,2	25 611	45/40
K	10	LIF 100	K $\alpha$ 1,2	136 774	40/45
Mg	10	OVO 55	K $\alpha$ 1,2	20 358	30/60
Na	10	OVO 55	K $\alpha$ 1,2	24 56	30/60
P	10	PET	K $\alpha$ 1,2	89 612	30/60
Si	10	PET	K $\alpha$ 1,2	109 232	30/60
Ti	20	LIF 100	K $\alpha$ 1,2	86 21	40/30

La curva de calibración se obtuvo al trazar intensidad vs. concentración y se utilizaron los estándares certificados: QLO, RGM, FKN-4, BX-N, GLO, W-2, BHVO-2, NOD-P-1, STM-1, AL-1, NOD-A-1, BR-2 para cada elemento

• Estandarización.

Para obtener la precisión se utilizó un subestandar SONC-4, se realizaron 5 pastillas bajo las mismas condiciones de preparación de las muestras. Los resultados de la precisión se presentan en la tabla 9

**TABLA 9.** Precisión de fluorescencia de rayos X

COMPUESTO	Desviación estándar S	Coefficiente de variación C V	media X
SiO <sub>2</sub>	4 080	4 9%	82 95
TiO <sub>2</sub>	0 022	3 75%	0 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 618	5 5%	11 23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 175	6 64%	2 64
MgO	0 030	20 93%	0 16
CaO	0 084	3 95%	2 12
K <sub>2</sub> O	0 138	4 4%	3 16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0 122	4 4%	3 16

La exactitud se determino utilizando un estandar certificado ANG-1, al que se le siguió el mismo procedimiento que las muestras. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

**TABLA 10. Exactitud del método de fluorescencia de rayos X**

	Valor reportado <sup>c</sup>	Valor obtenido <sup>d</sup>	Error relativo
SiO <sub>2</sub>	65.94% ± 1.93	65.92% ± 0.4	-0.03%
TiO <sub>2</sub>	0.61% ± 0.36	0.60% ± 0.04	1.66%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.35% ± 0.56	16.52% ± 1.27	1.03%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.97% ± 0.18	4.00% ± 0.36	0.75%
MgO	1.03% ± 0.39	0.94% ± 0.06	-8.74%
CaO	3.20% ± 0.047	3.22% ± 0.17	0.63%
K <sub>2</sub> O	3.60% ± 0.016	3.63% ± 0.28	0.83%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25% ± 0.144	0.31% ± 0.25	24.0%

<sup>c</sup> El intervalo de confianza se obtuvo al 99% de confianza con n=6.

<sup>d</sup> El intervalo de confianza se obtuvo al 99% de confianza con n=5.

***ANÁLISIS DE RESULTADOS  
Y DISCUSIÓN***

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

La zona de estudio se ha dividido en dos partes para facilitar su interpretación: la zona Este que corresponde a la parte Sonora, Sinaloa y Nayarit, y la zona Oeste que corresponde al Golfo de California, además que ambas partes presentan características diferentes

### **ZONA ESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA.**

#### **• Análisis composicional.**

En esta zona se analizan 29 muestras en total. De la tabla 11 se observa que predomina más el aporte terrígeno (82.75%) con 24 muestras y el aporte biogénico es menor y está representado por 5 muestras (17.24%)

#### **FRACCIÓN TERRIGENA.**

Elementos mayores - En la fracción terrígena de esta zona predomina el óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) con una concentración promedio de 75.72%, siendo las muestras R9 (85.24%) y R19 (86.54%) los valores más altos, y la muestra R11 (61.50%) la que corresponde al valor más bajo.

Así mismo, las concentraciones promedio de los óxidos de sodio y potasio y silicio, se encuentran por arriba de la abundancia en la corteza terrestre (tabla 1), para los óxidos de sodio y potasio las concentraciones en general no varían mucho, tienen una desviación estándar de 0.92 y 0.84 respectivamente.

Las concentraciones promedio del óxido de aluminio, de calcio, hierro, titanio, magnesio, manganeso y fósforo ( $r=10.88, 2.38, 2.04, 0.63, 0.73, 0.05$  y  $0.01\%$  respectivamente), se encuentran por debajo de la abundancia en la corteza terrestre (tabla 1). De la misma manera, las muestras R11 y R12 tienen concentraciones de calcio (7.02% y 7.49% respectivamente) altas, la muestra R11 es la de mayor concentración de óxido de hierro (10.55%), magnesio (1.63%) y manganeso (0.22%). La muestra R14 es la de mayor concentración de óxido de titanio (3.19%). Cabe mencionar también que para el óxido de magnesio hubo 10 muestras en las que no se detectó concentración significativa.

TABLA 11. COMPOSICION QUIMICA DE LA ZONA ESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA

Fracccion terrigena

No	NaCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mg(OH) <sub>2</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	Ca	Na	Mg	Ca	Fe	Si	Al	Ti			
82	15.78	12.78	2.83	3.58	1.19	1.93	2.32	2.84	2.04	2.21	1.23	99.87	83.30	11.90	8.89	4.49	4.94	16.79	4.85	44.90	18.80	
83	16.18	11.08	1.94	2.29	2.43	2.26	2.36	2.73	2.21	2.55	2.21	99.81	82.20	4.35	15.90	5.20	15.30	25.90	86.92	37.45	38.00	
84	16.45	12.51	4.48	3.17	1.18	0.29	1.80	2.43	2.19	1.27	1.63	99.99	58.12	12.79	9.89	4.97	44.78	22.00	292.15	37.31	37.30	
85	15.83	15.96	6.75	3.23	1.21	0.52	1.89	2.21	2.27	1.62	2.43	99.99	58.80	6.00	8.72	4.90	24.31	19.44	28.12	48.43	37.20	
86	19.52	4.25	2.12	3.27	1.87	2.55	1.79	2.84	2.21	2.21	2.20	99.99	43.72	6.00	14.98	5.20	8.89	23.48	39.80	37.45	32.50	
87	16.82	6.83	3.31	3.37	1.29	2.87	2.49	2.47	2.09	2.21	2.38	99.57	39.90	11.91	14.72	4.90	3.82	14.82	44.12	84.81	18.80	
88	11.45	16.45	3.37	2.38	3.49	0.82	2.28	2.00	2.21	2.11	1.42	99.98	64.20	1.78	14.82	4.88	2.43	17.42	54.71	19.88	14.82	
89	16.24	4.12	2.73	2.26	1.17	0.89	2.28	2.00	2.21	2.21	1.18	99.98	44.80	6.00	4.82	4.82	4.82	14.77	12.84	24.81	7.82	
90	18.91	11.4	1.19	1.82	4.49	2.27	2.31	1.24	1.98	2.21	2.42	99.98	43.80	6.00	2.07	4.81	14.28	11.54	5.82	28.21	11.22	
91	18.91	11.43	1.28	1.22	7.52	15.85	2.31	1.43	2.21	2.21	1.58	100.00	53.30	4.35	14.82	4.87	14.19	24.86	362.19	62.18	232.75	
92	15.20	4.12	4.51	3.52	2.49	0.25	2.24	2.00	2.12	2.21	2.30	99.88	28.62	14.83	9.84	4.88	4.81	4.81	4.81	347.90	51.81	22.20
93	12.58	16.43	2.84	1.74	3.78	3.62	2.53	1.96	2.21	2.21	1.80	100.21	64.17	21.28	12.21	1.20	31.21	20.8	284.80	62.18	82.80	
94	16.85	12.88	2.62	2.67	2.86	0.87	3.19	2.88	2.12	2.21	1.54	99.98	61.80	6.00	18.19	4.87	13.43	28.71	81.20	142.25	63.50	
95	16.11	8.22	4.51	2.87	2.27	2.33	2.78	2.58	2.58	4.00	1.50	99.99	51.80	6.00	11.89	4.87	11.81	14.49	82.30	16.33	4.80	
96	11.99	14.25	3.25	3.75	1.87	2.83	2.39	2.37	2.29	2.21	1.12	99.98	62.72	1.74	14.28	4.71	6.38	14.78	12.22	15.74	50.42	
97	23.75	11.22	2.84	2.28	2.84	0.72	2.78	2.00	2.21	2.21	1.24	99.98	72.81	6.00	4.73	4.73	2.13	6.45	154.12	8.45	8.18	
98	16.34	3.65	2.88	2.54	1.31	0.25	2.28	2.00	2.21	2.21	1.81	99.98	46.77	1.74	4.74	4.74	1.80	14.21	119.82	14.28	14.20	
99	12.48	11.86	2.87	2.41	3.57	2.58	2.27	2.78	2.21	2.21	1.81	99.99	61.80	16.72	4.87	4.87	1.72	8.31	82.80	8.81	13.12	
100	16.71	4.25	2.44	4.87	2.54	0.68	2.11	2.00	2.21	2.21	1.54	99.98	60.80	13.19	8.77	4.73	3.21	15.74	81.20	22.81	11.42	
101	17.29	11.97	3.23	4.11	0.93	0.77	2.12	2.00	2.21	2.21	1.71	99.98	59.25	1.74	9.33	4.86	4.86	13.89	148.33	25.81	18.21	
102	11.86	4.44	1.96	3.12	0.52	0.81	0.12	2.00	2.21	2.21	0.87	100.00	58.80	0.50	8.24	4.82	4.82	13.89	37.71	25.11	18.21	
103	16.91	12.76	2.87	3.78	1.38	0.46	0.12	2.00	2.21	2.21	0.85	100.00	61.83	6.00	8.21	4.87	4.87	13.89	152.12	8.21	18.20	
104	19.37	14.83	4.71	3.87	1.68	0.28	2.22	2.00	2.21	2.21	2.24	100.00	49.58	21.72	13.83	4.86	25.25	13.83	22.81	27.28	18.50	
105	17.42	16.52	3.89	3.89	1.89	1.23	2.28	1.96	2.21	2.21	4.47	100.00	68.24	2.83	8.81	3.89	18.80	25.71	98.80	81.80	44.71	
106	19.37	12.88	2.82	2.86	2.58	2.54	0.81	0.73	0.25	2.21	1.72	99.98	64.83	8.34	13.31	4.83	11.78	18.21	154.28	42.72	38.42	
107	6.18	1.81	1.82	2.84	4.41	2.58	2.81	0.38	0.28	2.00	0.78	2.28	10.68	7.83	4.44	2.22	1.11	5.74	115.33	23.42	40.38	

ND = no detectado

Fracccion biogenica

No	NaCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>			
81	81.0	6.02	1.55	3.89	
81a	10.22	1.72	3.89	2.29	
82a	81.86	1.27	1.13	14.87	
83a	58.81	3.37	2.84	2.42	
83b	44.71	1.11	2.21	6.78	
84a	81.84	2.81	2.21	3.71	
85a	6.21	1.21	2.22	4.77	

Cabe mencionar que el óxido de silicio es el que tuvo mayor error. La lectura en fluorescencia de rayos X de éste óxido, fue el que mayor problema presentó, ya que salía un valor muy alto y para eliminar esta interferencia se diluyó la pastilla (0.5 g de muestra y 9.5 g de tetraborato de litio).

**Metales traza:** Se observa que hay una alta concentración de estroncio en la muestra R22 (501.60 ppm), siendo el promedio de 134.26 ppm, sin embargo la dispersión de datos es muy grande (desviación estándar= 135.35). Lo mismo sucede para el vanadio con una concentración desde 233.70 ppm (R11) a 7.40 ppm (R9), para cromo desde 1.90 ppm (R19) hasta 74.59 ppm (R11) y para el zinc, la muestra R26 con una concentración de 9.21 hasta 140.05 ppm de R14.

El cadmio no muestra mucha variación en sus concentraciones (4.54-5.45 ppm), así mismo para el níquel (9.35-28.73 ppm).

Resumiendo, el orden decreciente de concentración de los elementos mayores es  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{TiO}_2 > \text{MgO} > \text{MnO} > \text{P}_2\text{O}_5$ . Y el orden para los elementos traza es el siguiente:  $\text{Sr} > \text{Zn} > \text{V} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Cd}$ .

Hay algunas muestras que destacan por sus concentraciones:

→ Las muestras R9 y R19 tienen una concentración mayor de óxido de silicio (86.24% y 86.54%) respectivamente) y tienen la menor concentración de óxido de aluminio (5.12% y 5.65% respectivamente).

→ La muestra R11 es la muestra con una concentración de óxido de silicio (61.50%) que más se acerca a la abundancia en la corteza (61.90%) y contiene que es la que presenta una mayor concentración de óxido de calcio (7.02%), de hierro (10.55%), magnesio (1.63%) y manganeso (0.22%). Es la que presenta las más altas concentraciones de cromo (74.59 ppm) y vanadio (233.70 ppm).

→ La muestra R14 tiene la más alta concentración de óxido de titanio (3.19%), así mismo es la de mayor concentración de níquel (28.73 ppm) y zinc (140.05 ppm).

### **INTEMPERISMO QUIMICO.**

El valor promedio del índice químico de alteración (IQA) de la zona Este del Golfo de California, es de 54.84%, lo que se puede considerar un valor medio. En esta zona el clima y el relieve son factores importantes para la formación de sedimento en la costa. El clima es variado en toda la costa, cambiando de seco a subhúmedo hacia la parte sur. Y el otro factor es la distancia de la parte montañosa a la costa, por tal razón es de esperar que el IQA varíe a lo largo de toda la costa.

### **FRACCIÓN BIOGÉNICA.**

En esta zona sólo se presentan 5 muestras carbonatadas con un alto contenido de carbonato de calcio (tabla 14), cuyos valores van desde 88.8% de la muestra R21 hasta 76.02% de la muestra R16. El orden decreciente para los siguientes elementos es de  $\text{FeCO}_3 > \text{MgCO}_3 > \text{SrCO}_3$ .

Se observa que las dos muestras más altas en carbonato de calcio, R1 (82.9%) y R21 (88.8%) coinciden con las concentraciones más altas de carbonato de magnesio y carbonato de estroncio cuyos valores son respectivamente 4.62% y 0.55% para R1 y 3.37% y 0.54% para R21.

La muestra R20 presenta la concentración más alta de carbonato de hierro, la cual es 14.87%.

#### **• Análisis de correlación de matriz.**

La tabla 12 representa los resultados en una matriz de correlación. Los valores arriba de 0.496 son los que tienen significado estadístico con 99% de confianza.

Para la fracción ferrígena se observan tres asociaciones:

1. La asociación del óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) con el IQA presenta un valor de correlación alto (0.90), y esto se debe a que el grado de intemperización se evaluó utilizando la concentración de aluminio.

2. El óxido de calcio (CaO) presenta una correlación estadísticamente significativa con el óxido de manganeso, pentóxido de fósforo, estroncio y vanadio, lo que hace suponer la existencia del mineral apatita (apéndice 3), un mineral de pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) con calcio, donde a veces sustituyen el manganeso y el estroncio al calcio. La sustitución del ion fosfato ( $PO_4^{3-}$ ) por el ion vanadato ( $VO_4^{3-}$ ) en la apatita ha sido reportado <sup>21</sup> explicando así la correlación observada entre el calcio y el vanadio.
3. La alta correlación que presenta el hierro con magnesio, manganeso, titanio, cromo, níquel, zinc y vanadio se puede explicar a través de la existencia de magnetita, en este mineral cantidades considerables de  $Mg^{2+}$  y  $Mn^{2+}$  sustituyen al  $Fe^{2+}$  y el  $Al^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$  y  $Ti^{4+}$  sustituyen al  $Fe^{3+}$ . Algunas veces el hierro es sustituido por níquel.
- La asociación observada entre hierro, magnesio, titanio, manganeso, cromo, níquel, zinc y vanadio sugiere la presencia de estos elementos en las mismas fases minerales.

Podemos observar para la fracción biogénica, que hay una correlación estadísticamente significativa con 99% de confianza entre el carbonato de calcio, estroncio y magnesio, lo cual se puede explicar debido a que los tres cationes forman parte de la misma familia y presentan la misma carga,  $2+$ , y más o menos el mismo tamaño, por tanto es fácil que se reemplacen los cationes.

TABLA 12. ZONA ESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA  
ANÁLISIS DE CORRELACIONES

Fracción terrígena

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	*K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	IP <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PI	IGA	CO <sub>3</sub>	Cu	Cd	Cr	Ni	Sr	Zn	Pb
SiO <sub>2</sub>	1.00	-0.68	-0.01	0.44	-0.53	-0.71	-0.56	-0.69	-0.54	0.02	-0.28	-0.45	-0.07	-0.57	0.34	-0.62	-0.55	-0.39	-0.59	-0.67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1.00	-0.32	-0.26	0.12	0.14	0.08	0.20	-0.12	0.24	0.11	<b>0.90</b>	-0.01	0.13	0.12	0.07	0.04	0.31	-0.06	0.15
Na <sub>2</sub> O			1.00	0.30	0.07	-0.12	0.06	-0.05	0.24	0.24	0.39	-0.51	0.36	0.29	0.53	0.15	0.11	0.00	0.21	-0.03
*K <sub>2</sub> O				1.00	-0.61	-0.52	-0.33	-0.61	-0.35	0.11	0.26	-0.19	0.22	0.21	-0.34	-0.52	-0.30	-0.27	-0.12	-0.58
CaO					1.00	0.43	0.20	0.45	0.60	-0.05	-0.22	0.15	0.29	0.26	0.46	0.15	0.52	0.15	0.57	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						1.00	0.73	<b>0.80</b>	0.74	-0.13	-0.22	0.68	-0.14	-0.57	0.22	0.77	0.72	0.58	0.71	<b>0.84</b>
TiO <sub>2</sub>							1.00	0.58	0.71	-0.16	-0.23	0.67	0.27	0.41	0.13	0.81	0.68	0.78	0.64	0.57
MgO								1.00	0.55	-0.14	0.19	0.11	0.28	0.53	0.54	0.74	0.75	0.72	0.59	0.78
MnO									1.00	0.31	-0.27	-0.31	-0.06	0.34	0.15	0.71	0.43	0.29	0.62	0.74
IP <sub>2</sub> O <sub>5</sub>										1.00	0.14	-0.51	0.16	-0.28	0.14	-0.18	0.42	0.42	0.25	-0.04
PI											1.00	0.02	0.16	0.63	0.56	-0.24	0.42	-0.64	0.43	-0.06
IGA												1.00	-0.21	0.04	0.04	-0.03	0.54	0.09	0.50	0.03
CO <sub>3</sub>													1.00	-0.07	0.00	0.05	-0.18	0.38	-0.06	0.01
Cu														1.00	0.40	0.39	0.81	-0.28	0.77	0.35
Cd															1.00	0.22	0.62	0.06	0.29	0.24
Cr																1.00	0.42	0.29	0.50	0.62
Ni																	1.00	-0.15	0.62	0.51
Sr																		1.00	-0.12	0.35
Zn																			1.00	0.40
Pb																				1.00

Para n=24 y 95% de confianza estadísticamente son significativos valores >0.496

Fracción biogénica

	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	SiCO <sub>3</sub>	FeCO <sub>3</sub>
CaCO <sub>3</sub>	1.00	0.64	0.92	0.46
MgCO <sub>3</sub>		1	0.84	-0.38
SiCO <sub>3</sub>			1	-0.64
FeCO <sub>3</sub>				1

Para n=5 y 99% de confianza estadísticamente son significativos valores >0.754

• **Análisis de factores.**

A través del análisis de factores podemos apreciar qué características químicas diferencian entre sí a las muestras estudiadas. En el presente caso tres factores explican el 66.63% de la variación de las muestras (tabla 13)

Factor 1. En este factor las variables principales son los óxidos de hierro, titanio, magnesio y manganeso, y como elementos traza se encuentran el cromo, níquel, zinc y vanadio. Por tanto, el 37.84% de las características de esta zona se explica con base en minerales ferromangésicos.

Factor 2. Las variables de mayor peso dentro de este factor son el IQA y el óxido de aluminio, lo que nos dice que el 14.76% de las características de esta zona se explican por el intemperismo.

Factor 3. Este factor explica el 14.04% de las características de la zona basándose en la presencia de fosforitas, ya que las variables más importantes son el óxido de calcio y fósforo y el elemento traza, estroncio.

**TABLA 13. ZONA ESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA.  
ANALISIS DE FACTORES**

	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3
%S-O2	-0.66217	-0.551589	-0.313252
%Al2O3	0.052585	<b>0.954272</b>	0.144075
%Na2O	0.095375	-0.405155	0.143842
%K2O	-0.469756	-0.182579	-0.290181
%CaO	0.405664	-0.092235	<b>0.788503</b>
%Fe2O3	<b>0.921654</b>	0.088671	-0.014286
%TiO2	<b>0.877293</b>	0.055162	-0.1149
%MgO	<b>0.744407</b>	0.166835	0.165986
%MnO2	<b>0.830987</b>	-0.276437	0.302737
%P2O5	-0.125499	-0.427952	<b>0.71914</b>
%P1	-0.087574	0.064625	0.047407
IQA	-0.015121	<b>0.95188</b>	-0.200219
%CO3	-0.095528	0.029893	0.526529
Cu (ppm)	0.500082	0.057032	-0.223152
Cd (ppm)	0.106557	0.027483	0.223554
Cr (ppm)	<b>0.903033</b>	0.022586	0.163653
Ni (ppm)	<b>0.688927</b>	-0.013892	-0.238408
Sr (ppm)	0.158456	0.278563	<b>0.798246</b>
Zn (ppm)	<b>0.674892</b>	-0.013426	-0.159701
V (ppm)	<b>0.835702</b>	0.089907	0.280067
Peso de cada factor	37.84%	14.76%	14.04%

• **Análisis de la composición química por provincias litológicas.**

La composición química de los sedimentos litorales está determinada fundamentalmente por el tipo de roca fuente que dio origen a los sedimentos, por lo que se tomó en cuenta la litología predominante en el área, de acuerdo a la carta geológica de la República Mexicana<sup>(26)</sup>.

La zona Este del Golfo de California se dividió en dos provincias según la litología (figura 10):

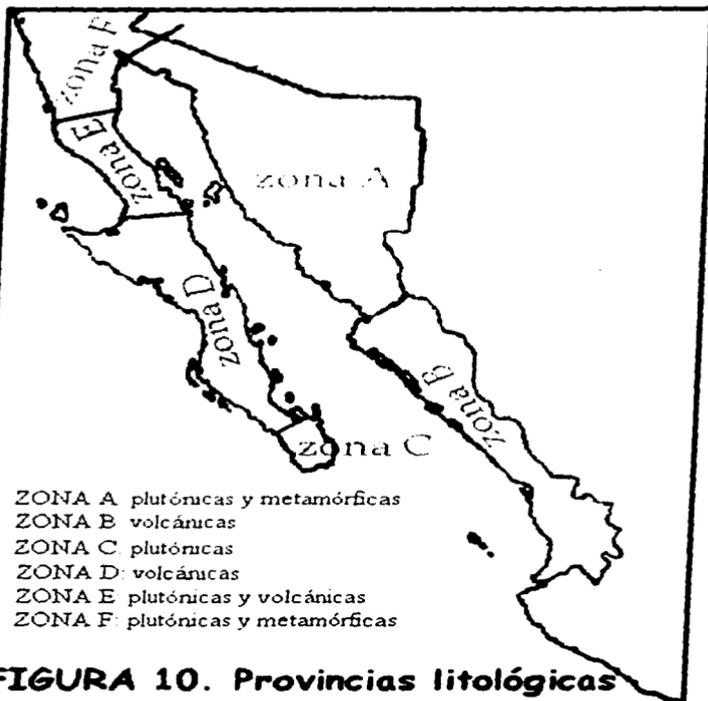
PROVINCIA	LITOLOGÍA	AREA
A	Rocas plutónicas y metamórficas	Sonora
B	Rocas volcánicas	Sinaloa y Nayarit

**PROVINCIA A.**

*Fracción terrígena* - Consta de 9 muestras donde predomina en el estado de Sonora el óxido de silicio (77.96%), el óxido de aluminio (11.49%), óxido de potasio (3.33%) como elementos mayores y como elementos menores el Cd (4.73 ppm) y Sr (140.70 ppm). En esta zona hay casi ausencia de óxido de magnesio, a excepción de dos muestras R22 (0.56%) y R29 (1.06%).

La provincia A correspondiente a las costas de Sonora, se caracterizan por el predominio de rocas plutónicas y metamórficas. Las rocas plutónicas más comunes presentes en los continentes están formadas por piroxenos, cuya composición química se puede expresar por la fórmula general  $XYZ_2O_6$ , donde X representa  $Na^{+1}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$  y  $Li^{+1}$ ; Y representa  $Mn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $Al^{+3}$ ,  $Cr^{+3}$  y  $Ti^{+4}$  y Z representa  $Si^{+4}$  y  $Al^{+3}$ <sup>(27)</sup>.

Las rocas metamórficas usualmente sufren cambios texturales y mineralógicos. La roca original de la que se ha derivado una roca metamórfica puede ser ígnea o sedimentaria.



**FIGURA 10. Provincias litológicas del Golfo de California**



La composición química de esta provincia puede explicarse debido a que en esta parte se encuentra la desembocadura del Río Colorado donde la principal descarga es predominantemente de minerales ferromagnesianos como piroxenos, anfíboles, granates, etc.<sup>(21)</sup>

*Fracción biogénica* - Está representada por tres muestras donde el carbonato de calcio es el de mayor concentración promedio (86.43%), siendo la muestra R21 (88.8%) la de más alto valor de carbonato de calcio y de magnesio (3.37%). La concentración del carbonato de hierro también es alta (6.83%), representando la muestra R20 (14.87%) la de valor grande. Se sabe que esta zona del Golfo de California es menos abundante en carbonatos<sup>(22)</sup>, explicando así el predominio de la fracción terrígena sobre la fracción biogénica.

*IOA* - En esta zona el promedio del intemperismo químico es 57.88%, el cual es un valor medio y comparando con la provincia B, esta zona se encuentra más intemperizada. La muestra R18 tienen el valor más alto de IOA, 72.91%, se debe probablemente a que el lugar de depositación se encontraba lejos del afloramiento de la roca ígnea. El estado de Sonora se caracteriza por tener un clima seco a desértico, acelerando el proceso de intemperización; también hay que considerar que las posibles fuentes de sedimentos a la costa son el Desierto de Sonora y la Sierra Madre Occidental, lugares que se encuentran atejados de la playa.

#### **PROVINCIA B.**

*Fracción terrígena* - La concentración promedio del óxido de silicio es 74.38% y las concentraciones de las muestra en general son bajas (61.50%-79.52%), a excepción de la muestra R9 (86.24%). La concentración de óxido de aluminio es baja (10.52%). Las concentraciones promedio de óxido de sodio, calcio, hierro y titanio son las más altas de la parte este del Golfo de California ( $\bar{X}$  = 34.5%, 2.86%, 2.81% y 0.93%).

Aunque la concentración del óxido de magnesio en esta zona (0.72%) fue muy parecida a la provincia A (0.81%), aquí hubo más muestras con concentraciones de MgO mayores.

Se observan concentraciones altas de todos los metales en esta parte del Golfo de California, siendo las concentraciones promedio: Cu (12.39 ppm), Cd (4.89 ppm), Cr (23.46 ppm), Ni (20.23 ppm), Sr (130.36 ppm), Zn (50.97 ppm) y V (50.05 ppm).

En los estados de Sinaloa y Nayarit predominan las rocas volcánicas donde destacan los minerales: silicatos, los cuales pueden ser ricos en ferromagnesianos. Los silicatos más comunes son los feldspatos de sodio, potasio y calcio, como por ejemplo, la albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) y ortoclasa ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )<sup>(28)</sup>.

El origen de las rocas volcánicas puede ser explicado por la existencia de la Sierra Madre Occidental, la cual está formada en casi toda su extensión por rocas ígneas volcánicas<sup>(22)</sup>.

*Fración biogénica.* - consta de sólo dos muestras con un alto contenido de carbonato de calcio, magnesio y hierro. Se observa que la muestra R1 tiene mayor cantidad de carbonato de calcio, magnesio, hierro y estroncio (82.9%, 4.62%, 3.89% y 0.55% respectivamente) que la muestra R16.

*IQA* - Los estados de Sonora y Nayarit tienen un valor medio de IQA, 53.04% y el intervalo de valor de este parámetro es de 28.60%-64.17%, los cuales son valores bajos y significa que el lugar de depositación se encuentra cercano al lugar de origen de la roca ígnea.

## ZONA OESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA.

### • Análisis composicional.

Esta zona consta de 25 muestras, en donde el aporte biogénico es de 44% (11 muestras) y el aporte continental es de 56% (14 muestras). Esta parte se explicará con base en la tabla 15.

#### **FRACCIÓN TERRÍGENA**

Elementos mayores - Las concentraciones promedio de los óxidos de, silicio (72.4%), aluminio (12.59%), sodio (3.35%) y calcio (4.56%) se acercan mucho a la abundancia en la corteza terrestre (tabla 1).

El óxido de silicio es el elemento más abundante con un valor promedio de 72.4%. Se observan dos grupos de muestras, aquéllas con un valor bajo (54.24%-60.97%), y el otro grupo con valores altos de sílice (69.10%-86.84%).

La concentración promedio del óxido de aluminio es alta, 12.59%. Se encuentra una muestra con un valor muy bajo de óxido de aluminio, la muestra R49 (0.64%), la cual es también la muestra con el valor más alto de  $SiO_2$ .

Las concentraciones de óxido de sodio no varían mucho, tienen una desviación estándar de 0.9, y el intervalo de concentración de  $Na_2O$  para esta zona es 1.28% a 4.4%.

La concentración promedio del óxido de calcio es 4.56% y hay una variación apreciable en la concentración de las muestras, lo que se observa en el valor de la desviación estándar el cual es 3.4. La muestra R31 representa el valor más alto de concentración, 13.56% y la muestra R30 es la de menor valor de  $CaO$ , 0.56%.

Las concentraciones promedio de los óxidos de potasio (1.96%), óxido férrico (2.17%) y óxido de magnesio (1.64%) fueron similares, sólo que menor dispersión de datos para el óxido de magnesio (desv. Est. = 0.61) y mayor variación de concentración de muestras para el óxido de potasio (des. Est. = 1.68). Para óxido de magnesio se encontraron 8 muestras en las cuales no se detectó una concentración apreciable y para el óxido férrico fueron sólo 4 muestras.

TABLA 15. COMPOSICION QUIMICA DE LA ZONA OESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA

Fracción terrígena																					
No	%SiO2	%Al2O3	%Na2O	%K2O	%CaO	%Fe2O3	%TiO2	%MgO	%MnO	%P2O5	P.I.	TOTAL	%CaCO3	Ca ppm	Co ppm	Cr ppm	Ni ppm	Sr ppm	Zn ppm	V ppm	
R30	75.93	13.15	3.45	0.41	0.56	ND	0.01	ND	0.02	ND	0.46	99.99	55.8	ND	10.78	ND	4.04	16.17	118.00	16.17	11.2
R31	54.24	19.57	3.89	0.98	13.65	1.83	0.36	1.21	0.06	0.06	4.10	100.00	51.4	11.08	20.46	ND	18.21	22.76	795.80	45.53	54.10
R32	62.67	12.84	4.11	1.31	6.06	2.23	1.13	2.49	0.06	0.03	5.71	99.99	48.8	14.63	23.18	ND	27.70	18.53	452.50	51.84	71.22
R36	84.29	6.13	3.16	4.90	0.96	ND	0.02	ND	ND	ND	0.38	99.99	45.4	ND	8.75	ND	11.50	13.12	17.07	8.75	4.53
R37	80.92	9.02	3.11	2.33	2.51	0.24	0.09	ND	0.01	0.02	1.76	100.00	33.2	ND	4.90	ND	0.67	13.48	49.62	25.24	12.90
R40	79.18	13.70	1.28	2.08	1.84	0.71	0.14	ND	0.01	ND	1.03	100.00	72.3	11.98	9.24	ND	3.47	9.24	482.00	23.08	22.70
R41	55.55	21.40	4.41	1.44	6.61	3.29	0.64	1.60	0.06	0.02	4.61	99.99	62.8	ND	33.89	ND	33.89	28.24	499.70	64.88	141.90
R42	57.51	19.90	3.31	2.03	5.99	3.45	0.46	1.73	0.06	0.12	6.47	100.74	64.3	17.12	54.29	ND	16.20	21.72	601.24	76.01	152.40
R48	73.92	13.26	4.35	1.54	2.87	1.32	0.34	0.74	0.04	0.01	1.57	100.00	80.8	18.84	22.40	ND	31.32	22.37	22.37	49.27	84.90
R49	86.64	0.64	1.82	0.46	5.90	0.63	0.19	ND	0.03	0.03	3.14	100.00	7.26	17.48	18.48	ND	18.48	18.48	36.96	184.40	
R50	81.18	7.87	3.89	0.83	3.55	1.45	0.56	ND	0.06	0.01	0.55	99.98	48.4	4.35	5.88	ND	23.58	17.68	17.68	35.37	112.00
R51	79.00	13.08	3.02	1.23	2.71	ND	0.04	ND	0.01	ND	0.88	100.00	65.3	3.06	4.90	ND	1.61	13.78	13.78	8.18	8.90
R52	75.02	15.44	4.40	0.83	3.40	ND	0.04	ND	0.01	0.01	0.84	99.98	64.1	ND	4.62	ND	1.61	13.78	13.78	9.18	1.80
R53	69.10	10.17	2.68	1.03	5.51	4.96	2.98	2.04	0.13	0.02	0.81	99.54	52.4	11.42	9.72	ND	43.56	19.16	19.16	80.16	152.90
PMU47	72.4	12.59	3.35	1.96	4.56	2.17	0.53	1.64	0.04	0.03	2.32	100.01	53.4	11.96	16.48	ND	17.65	17.75	221.23	38.54	78.29
CEV1	11.1	5.7	0.9	1.68	3.4	1.5	0.8	0.61	0.03	0.04	2.09	0.2	19.8	5.32	14.0	0.90	14.51	4.67	271.08	24.90	64.40

ND = no detectado

Fracción biogénica

No	%CaCO3	%MgCO3	%SiCO3	%FeCO3
R32	83.2	3.39	0.40	0.84
R33	64.8	4.49	0.80	0.84
R34	48.34	4.32	0.07	10.81
R38	44.48	0.84	0.13	0.83
R39	62.96	3.43	0.96	0.41
R43	93.72	4.25	0.76	0.85
R44	97.53	2.06	0.54	0.42
R45	96.18	9.55	0.68	0.42
R46	72.63	4.22	0.54	1.26
R47	62.17	2.55	0.13	4.24
R54	74.14	2.3	0.07	3.02
PMU47	78.11	4.13	0.44	2.18
CEV1	19.4	2.15	0.31	3.11

Para el  $K_2O$ , la muestra con mayor concentración fue la R30 (6.41%) y la de menor fue la R49 (0.46%). Para el  $Fe_2O_3$ , la muestra R53 (4.98%) representó la de mayor valor y la muestra R35 (2.49%) fue la de mayor concentración para el  $MgO$ .

La concentración promedio del óxido de titanio (0.5%) es baja con respecto a la abundancia en la corteza terrestre. En general, todas las muestras tienen concentraciones abajo de 1%, a excepción de la muestra R53 (2.98%) con una concentración alta.

Las concentraciones promedio de óxido de manganeso y pentóxido de fósforo son iguales, y su valor es de 0.04%, el cual es muy bajo. En ambos compuestos se presentaron muestras a las que no se les detectó una concentración significativa.

Metales traza - En esta zona no se detectaron concentraciones apreciables de cadmio a lo largo de la península de Baja California, en las zonas muestreadas.

La concentración promedio de cobre, cromo y níquel es similar y se presenta en orden creciente: 16.48ppm, 17.65ppm y 17.75ppm respectivamente. Se observa que la desviación estándar es más pequeña para el níquel (4.97), lo que significa no hay mucha variación en sus valores, mientras que para el cromo y cobre es mayor y similar (14.5 y 14.0 respectivamente), y como se puede apreciar, el intervalo de concentración es mayor. La muestra con una concentración alta de cobre es la R42 (54.29 ppm), para el cromo está representada por la muestra R53 (48.59 ppm) y por último para el níquel es la muestra R41 (28.24 ppm) la que tiene un valor alto.

Las concentraciones del zinc y vanadio varían mucho en todas sus muestras, siendo para el zinc la muestra R53 (80.16 ppm) la de mayor valor y la R36 (8.75 ppm) con el valor de concentración más bajo. Para el vanadio el intervalo de concentración es de 6.53 ppm (R36) a 184.40 ppm (R49).

Por último el estroncio es el que muestra mayor variación en sus concentraciones, tiene una concentración promedio de 221.23 ppm y una desviación estándar de 271.08, lo que puede deberse a que no podemos predecir que las concentraciones de los metales traza deban ser parecidas, ya que puede haber afloramientos de metales asociados al estroncio en ciertos lugares y también a que las características geográficas, la presencia de la roca madre, etc., no

son parecidos en todas las zonas. Se observan dos grupos de muestras, las que tienen una concentración alta cuyo intervalo es 118.00 ppm a 755.80 ppm y están representadas por 8 muestras y el otro grupo, el cual es de concentraciones más bajas que van de 13.79 ppm a 49.60 ppm y consta de 8 muestras.

En resumen, el orden decreciente de concentración de los compuestos de elementos mayores<sup>f</sup> de esta zona es:  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{TiO}_2 > \text{MnO} > \text{P}_2\text{O}_5$ . Y los elementos traza se presentan en el siguiente orden  $\text{Sr} > \text{V} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cu}$ .

Se observaron algunas muestras que presentaban algunas características interesantes:

- ⇒ La muestra R31 presentó el valor más bajo de concentración de óxido de silicio (54.24%) y el valor más alto de óxido de calcio (13.65%) y de estroncio (755.80 ppm).
- ⇒ La muestra R49 corresponde al valor más alto de sílice (86.84%) y de vanadio (184.40 ppm) y al valor más bajo de óxido de aluminio (0.84%).
- ⇒ La muestra R53, representa el valor más alto de óxido férrico (4.98%), de óxido de litio (2.98%) y de los metales traza corresponde a la concentración más alta de cromo (48.59 ppm) y de zinc (80.16 ppm).

#### **INTEMPERISMO QUÍMICO.**

El valor del intemperismo químico de alteración es 53.4%, el cual es un valor medio. El clima en esta zona es principalmente seco, lo que acelera el proceso del intemperismo; por otro lado, tenemos una cadena montañosa a lo largo de la península adyacente a lado del Golfo de California, como resultado tenemos que la partícula disgregada de la roca viaja menos para llegar a la costa, y por tanto el intemperismo es menor. Estas dos razones podrían explicar el valor medio de IQA a lo largo de toda la península.

<sup>f</sup> Para elementos mayores se entiende aquéllos cuyas concentraciones se miden en porcentajes, mientras que los traza se miden en ppm.

### **FRACCIÓN BIOGÉNICA.**

La zona Oeste del Golfo de California se distingue porque hay un número apreciablemente alto de muestras carbonatadas, lo que propicia para su formación un ambiente de baja energía, de poco oleaje para dar oportunidad a la depositación de carbonatos.

En esta zona predomina el carbonato de calcio cuya concentración promedio es 76.11%. Hay que notar que hubo 5 muestras con las concentraciones más altas de  $\text{CaCO}_3$ , se encuentran arriba de 92.08%, siendo la muestra R44 (97.53%) la de más alto valor.

La concentración promedio de carbonato de magnesio es 4.13%. Hay dos muestras que presenta la concentración de carbonato de calcio más alta y coincide que son las muestras con la concentración de carbonato de magnesio más altas, las cuales son: R44 cuya concentración de  $\text{MgCO}_3$  es 7.08% y R45 con 8.55% de  $\text{MgCO}_3$ .

La concentración promedio de carbonato de estroncio es 0.44%. Se aprecia de la tabla 16 que la muestra con concentración más alta es R39 (0.96%). Similar al carbonato de magnesio, coincide que las muestras de mayor concentración de  $\text{SrCO}_3$  son las mismas muestras con mayor concentración de carbonato de calcio (R33, R39, R43-R45).

La concentración promedio del carbonato de hierro es 2.18%. Podemos advenir que la desviación estándar para el carbonato de hierro es grande, lo cual quiere decir que la variación de concentración de las muestras es notable, siendo la muestra con el valor más alto la R34 (10.81%) hasta el valor más bajo de concentración de 0.42% (para las muestras R39, R44, R45).

#### **• Análisis de correlación de matriz.**

En la tabla 16 se muestran los datos del análisis de correlación de matriz para la fracción terrígena y la fracción biogénica

En el análisis de correlación de matriz de la fracción terrígena se pueden apreciar tres grupos diferentes, los cuales son:

1. Se observa un correlación del óxido de aluminio con IQA con un valor estadísticamente significativo de 0.75, al igual que en la parte este del Golfo de California. Esto se explica porque la concentración del óxido de aluminio se utilizó para evaluar el parámetro IQA.
2. Se puede notar que hay una correlación entre el óxido de calcio, el pentóxido de fósforo y estroncio. Lo cual indica la presencia de fosforitas (o apatita), el cual es un mineral formado por calcio y pentóxido de fósforo, donde a veces el estroncio sustituye al calcio, lo que se explica por las propiedades químicas similares, ya que pertenecen a la misma familia.
3. Hay una correlación estadísticamente significativa entre el óxido férrico, óxido de magnesio, óxido de titanio, óxido de manganeso, como elementos mayores y con metales traza como el cromo, níquel, zinc y vanadio. Todos estos óxidos y metales constituyen los minerales ferromagnesianos.

El análisis de correlación de matriz de la fracción biogénica muestra sólo un grupo, donde se observa una correlación con un valor estadísticamente significativo (0.90) entre el carbonato de calcio y estroncio, lo cual se puede explicar porque ambos cationes, el ion  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Sr}^{2+}$ , pertenecen a la misma familia en la tabla periódica y por tanto presentan propiedades químicas similares como es el tamaño y la carga, por lo cual pueden sustituirse con facilidad.

**TABLA 16. ZONA OESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA**  
**ANÁLISIS DE CORRELACIONES**

**Fracción terrígena**

	SiO2	Al2O3	Na2O	K2O	CaO	Fe2O3	TiO2	MgO	MnO	P2O5	PI	IGA	CO3	Cu	Cr	Ni	Sr	Zn	V
SiO2	1.00	-0.84	-0.49	0.21	-0.74	-0.69	-0.32	-0.82	-0.62	-0.65	-0.76	-0.37	-0.22	-0.70	-0.40	-0.72	-0.80	-0.70	-0.29
Al2O3		1.00	0.48	-0.06	0.39	0.33	0.00	0.46	0.28	0.44	0.47	0.78	0.10	0.53	0.02	0.46	-0.71	0.34	-0.07
Na2O			1.00	-0.06	0.25	0.15	-0.02	0.31	0.19	0.07	0.22	0.77	-0.39	0.21	0.23	0.54	0.06	0.15	-0.07
K2O				1.00	0.53	-0.38	-0.30	-0.28	-0.37	-0.22	-0.31	0.06	-0.31	-0.11	-0.31	0.28	-0.11	-0.38	-0.48
CaO					1.00	0.53	0.29	0.63	0.53	0.64	-0.69	-0.17	0.30	0.43	0.39	0.62	0.66	0.55	0.40
Fe2O3						1.00	0.83	0.91	0.98	0.47	0.58	0.06	0.31	0.58	0.83	0.86	0.41	0.97	0.72
TiO2							1.00	0.69	0.83	0.09	0.10	-0.02	0.05	0.07	0.79	0.30	-0.01	0.71	0.51
MgO								1.00	0.81	0.51	-0.72	0.12	0.27	0.63	0.71	0.66	0.55	0.87	0.50
MnO									1.00	0.47	0.45	-0.01	0.24	0.51	0.85	0.70	0.30	0.83	0.77
P2O5										1.00	-0.77	-0.02	0.57	-0.78	0.13	0.48	0.68	0.58	0.45
PI											1.00	-0.05	0.47	-0.86	0.26	0.62	0.75	0.68	0.50
IGA												1.00	-0.06	0.08	-0.19	-0.07	0.29	0.01	-0.41
CO3													1.00	0.56	0.15	0.16	0.46	0.46	0.44
Cu														1.00	0.33	-0.69	-0.65	-0.71	0.58
Cr															1.00	0.67	0.07	0.80	0.70
Ni																1.00	0.41	0.74	0.66
Sr																	1.00	0.45	0.14
Zn																		1.00	0.80
V																			1.00

Para n=14 y 99% de confianza, son estadísticamente significativos valores >0.64

**Fracción biogénica**

	CaCO3	MgCO3	SiCO3	FeCO3
CaCO3	1.00	0.59	0.80	0.76
MgCO3		1.00	0.45	-0.15
SiCO3			1.00	-0.62
FeCO3				1.00

Para n=11 y 95% de confianza, son estadísticamente significativos valores >0.664

• **Análisis de factores.**

El análisis de factores se encuentra representado en la tabla 17. Las características de esta zona Oeste del Golfo de California son explicadas por tres factores:

**FACTOR 1.** Las variables principales de este factor contribuyen con un 49.83% para explicar las facciones de la península de Baja California y lo constituyen los óxidos de hierro, titanio, niobio y manganeso y los metales cromo, níquel, zinc y el vanadio. Todos estos elementos forman los minerales ferromagnesianos.

**FACTOR 2.** Este factor explica un 18.69% de las características de la zona y lo constituyen el pentóxido de fósforo, el carbonato y el estroncio, explicando así la existencia de fosforitas.

**FACTOR 3.** Las variables más importantes son el silicio y el vanadio, los cuales aportan un 11.49% para explicar las características de esta zona.

**TABLA 17. ZONA OESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA.  
ANALISIS DE FACTORES**

	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3
%SiO <sub>2</sub>	-0.409847	-0.643772	<b>0.484368</b>
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.077976	0.491334	-0.776650
%Na <sub>2</sub> O	0.082542	0.09604	-0.217083
%K <sub>2</sub> O	-0.284725	-0.065087	-0.093670
%CaO	0.282247	0.545270	-0.020399
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0.917487</b>	0.334528	-0.125801
%TiO <sub>2</sub>	<b>0.935659</b>	-0.187097	-0.077773
%MgO	<b>0.75273</b>	0.442810	-0.249671
%MnO <sub>2</sub>	<b>0.922182</b>	0.268500	-0.028279
%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.167604	<b>0.856933</b>	-0.040892
%PI	0.239431	-0.072091	-0.024607
IOA	-0.021296	-0.028423	-0.940348
%CO <sub>3</sub>	0.153123	<b>0.818549</b>	0.064572
Cu (ppm)	0.318291	-0.404359	-0.039062
Cr (ppm)	<b>0.914503</b>	0.052936	0.173867
Ni (ppm)	<b>0.529200</b>	0.549700	0.098177
Sr (ppm)	0.05995	<b>0.779145</b>	-0.443634
Zn (ppm)	<b>0.856276</b>	0.490169	-0.033874
V (ppm)	<b>0.692290</b>	0.402354	<b>0.472057</b>
Peso de cada factor	49.83%	16.69%	11.49%

• **Análisis de la composición química por provincias litológicas.**

La zona Oeste del Golfo de California se dividió en 4 provincias litológicas según la carta geológica de la República Mexicana<sup>(26)</sup> (tabla 18):

PROVINCIA	LITOLOGIA
C	Rocas plutónicas
D	Rocas volcánicas
E	Rocas plutónicas y volcánicas
F	Rocas plutónicas y metamórficas

**POVINCIA C.**

*Fracción terrígena.* - Esta zona consta de sólo 3 muestras con un valor alto de sílice (80.41%) en toda la península de Baja California. La muestra R36 representa la de mayor valor de sílice (84.39%) y la de menor valor de óxido de aluminio (6.13%), este último compuesto tiene una muestra con valor alto de óxido de aluminio, la muestra R30 (13.15%). En esta zona también hay altas concentraciones de óxido de potasio.

En esta parte de la península hubo muestras que no detectaron concentraciones de óxido férrico, óxido de magnesio, pentóxido de fósforo como óxidos elementos mayores, en lo que respecta a metales traza, se observa que el cadmio no se detectó en toda la península de Baja California a comparación de la parte Este del Golfo de California.

En esta zona predomina las rocas plutónicas, las cuales están representadas por minerales ferromagnesianos. El origen de esta roca se explica por la existencia de batolitos a lo largo de toda la península bajacaliforniana, el cual es un tipo de roca plutónica.<sup>27</sup>

*Fracción biogénica.* - Como se observa en la tabla 18, la fracción biogénica de esta provincia consta sólo de una muestra, pero es la que mayor concentración de carbonatos presenta (92.08%). Esta provincia se encuentra localizada en la parte sur de la península, y se ha reportado que en esta parte abundan los carbonatos, posiblemente por la existencia de un arrecife coralino.<sup>28</sup>



**IQA.**- el valor promedio del índice químico de alteración es medio, 49.80%. En esta zona se encuentra la Sierra Trinidad, formada por cadenas de montañas de pequeña altura, la más alta mide 900 m, la cual se encuentra cerca de la costa. Estos factores ayudan a que el material rocoso que llega a la playa no tenga una intemperización muy fuerte. Más sin embargo el clima seco ayuda a que se intemperiza más rápido la roca.

#### **PROVINCIA D.**

*Fracción terrígena* - Esta provincia registra la menor concentración de óxido de silicio de la península (61.49%). La concentración de óxido de aluminio es alta (17.49%), siendo la muestra R41 la de mayor valor (21.40%). Así mismo el óxido de calcio también presenta concentración promedio alta (7.21%), corresponde a la muestra R31 la de mayor valor (13.65%). Hay tres muestras con concentraciones altas de óxido ferrico R42 (3.45%), R41 (3.39%) y R35 (3.23%), siendo esta última muestra la de concentración alta de óxido de titanio (1.10%) y óxido de magnesio (2.49%).

En cuanto a metales traza, las concentraciones promedio más altas están representadas por el cobre (28.21 ppm), estroncio (558.65 ppm) y zinc (53.46 ppm), lo cual es característico de rocas volcánicas en esta región. Se sabe que hay dos tipos de rocas ígneas, las ricas en silicio y pobres en minerales ferromagnesianos y las rocas ígneas pobres en silicio pero ricas en minerales ferromagnesianos<sup>27</sup>. El posible origen de estos sedimentos es la provincia bajacaliforniana.

*Fracción biogénica* - Esta provincia presenta un mayor número de muestras carbonatadas, con concentraciones altas, como lo son las muestras R33 (94.8%), R43 (93.72%), R44 (97.53%) y R45 (96.18%). Esta región tiene la concentración de carbonato de magnesio más alta (4.41%); tiene una muestra con alto contenido de óxido ferrico, R34 (10.81%).

Se tiene reportado que en esta parte del Golfo de California, la parte central y sur de la península, son las más ricas en carbonatos<sup>27</sup>.

**IQA.** - Esta zona presenta un valor promedio de intemperización de 59.98%, valor que indica que los sedimentos que componen las muestras han sufrido intemperización en su trayectoria del lugar de origen hacia la costa, y la posible causa de esto sea las sierras que se encuentran en la parte central de la península (ver ZONA DE ESTUDIO) están alejadas de la costa.

#### **PROVINCIA E.**

**Fracción ferrígena** - Consta de sólo dos muestras con un alto valor de óxido de silicio ( $\bar{X} = 80.38\%$ ) La muestra R48 (13.26%) es la que tiene una mayor concentración de óxido de aluminio y óxido de calcio (4.35%) y la muestra R49 tiene una concentración de óxido de calcio alta (5.90%) Con respecto a metales traza, los elementos cromo (24.90 ppm), níquel (20.43 ppm) y vanadio (134.45 ppm) son los que se encuentran más altos en esta provincia.

Esta zona se caracteriza por presentar principalmente rocas plutónicas y volcánicas, ambas son rocas ígneas, las cuales son ricas en silicatos no ferromagnesianos (feldespatos de sodio, calcio y potasio) y ferromagnesianos (píroxenos, olivinas, etc), lo que caracteriza esta zona según la composición química observada.

**Fracción biogénica** - En esta provincia se encontro solo una muestra con mayor fracción biogénica que terrígena. Esta muestra es de menor contenido de carbonato de calcio de todas las provincias litológicas, pero tiene una concentración alta de carbonato férrico. Se menciona que sólo en la parte sur y central de la península abundan los carbonatos<sup>171</sup>, estando la provincia E más cerca a la parte norte.

**IQA** - Esta provincia tiene el valor mas bajo de índice químico de alteración. En la zona de estudio se menciona que en la parte sur de la zona septentrional, se encuentra una cadena de montañas cercanas al Golfo de California y son de una altura considerablemente "pequeña" (500 y 1500 m)<sup>172</sup>; en comparación con las sierras del norte.

## PROVINCIA F.

*Fracción terrígena.* - En esta provincia no se encuentran presentes muestras carbonatadas y la fracción terrígena está representada por 4 muestras. En esta región hay altas concentraciones de óxido de aluminio ( $X = 11.64\%$ ). Así mismo, esta zona es la que tiene concentraciones promedio altas de óxido férrico (3.22%), óxido de titanio (0.91%) y óxido de magnesio (2.04%) como elementos mayores. Las altas concentraciones de metales traza se encuentran representadas por la muestra R53, para el cromo, 48.59 ppm, para el níquel y estroncio, 19.18%; para zinc, 80.16 ppm y para vanadio, 152.90 ppm.

En esta zona abundan las rocas plutónicas y metamórficas, donde los minerales ferromagnesianos se encuentran presentes; lo que caracteriza a esta región es tener concentraciones altas de metales pesados como  $Fe^{2+}$ ,  $Ti^{4+}$ , etc.

*IQA* - Estos sedimentos se originaron de las sierras que se encuentran en la parte norte de la península de Baja California y tienen en promedio un valor de IQA más alto de toda la región, 65.16%. En esta parte norte se encuentran dos Sierras importantes, la Sierra de Juárez y la de San Pedro Mártir, las cuales tienen una altura considerable, alcanzan de 2,000 a 3,000 m. Pero estas sierras se encuentran cerca de la costa del Golfo de California, por tanto, los sedimentos no tienen que viajar una trayectoria grande para llegar a su destino.

## ***CONCLUSIONES***

## **CONCLUSIONES.**

De los análisis de resultados se puede deducir los siguientes puntos:

- La zona Este se caracteriza por tener una mayor proporción de fracción terrígena (82.75%) que biogénica (17.24%), mientras que para la zona Oeste del Golfo de California hay un aporte biogénico (44%) parecido al aporte terrígeno (56%)
- La característica principal de ambas zonas es la presencia de silicatos ferromagnesianos (piroxenos, anfíboles, granate, etc.)
- En la zona Este del Golfo de California en el estado de Sonora predominan los silicatos, principalmente de potasio. Mientras que para los estados de Sinaloa y Nayarit abundan los silicatos de calcio y sodio y minerales ferromagnesianos. El origen de estos minerales es el aporte de los ríos principalmente y la presencia de la Sierra Madre Occidental
- En la parte sur (provincia C) y en la parte media norte (provincia E) de la península de Baja California predominan los silicatos. En tanto, que en la parte media sur (provincia D) y norte (provincia F) predominan los minerales ferromagnesianos. Aparentemente el origen de estos minerales en las playas es la Sierra Bajacaliforniana
- Hay una diferencia notoria en ambas zonas en cuanto a la concentración de cadmio. En la parte Este del Golfo de California, la concentración promedio del cadmio es 4.38 ppm. Mientras que para la península de Baja California no se detectó una concentración apreciable de cadmio.
- De acuerdo con los análisis estadísticos, en ambas zonas se observa una asociación de pentóxido de fósforo con calcio, lo cual es indicativo de la presencia del mineral fosforita (o apatita).
- Respecto a la fracción biogénica, ambas zonas se caracterizan por tener alto contenido de carbonato de calcio, las cuales fueron concentraciones arriba de 44.0%, siendo las muestras correspondientes a la parte sur y central de la península de Baja California, las que mayor valor presentaron.

- Se observó una alta concentración de carbonato de hierro para la zona Este del Golfo de California, siendo este valor de 5.13%. En tanto que en la Península de Baja California, la concentración de carbonato de magnesio fue la predominante, 4.13%.
- El parámetro IQA en ambas zonas no es muy diferente entre sí, y tienen un valor medio, para la zona Este es de 54.85% y para la zona Oeste el valor promedio es 53.40%. Los factores que influyen en las dos partes son diferentes, en la parte Este del Golfo de California, los factores predominantes para evaluar el IQA fueron el clima seco a húmedo (de norte a sur), los aportes fluviales y pluviales, y la gran distancia del lugar de afloramiento de la roca ígnea al lugar de deposición. Mientras que para la península de Baja California, los factores que influyeron fueron el clima seco a desértico, la altura de las sierras y la corta distancia del lugar de origen de las rocas ígneas a las playas.
- Del lado Este predominan las rocas ígneas y metamórficas, en el estado de Sonora y para los estados de Sinaloa y Nayarit predominan las rocas ígneas volcánicas, lo cual se refleja en la composición de los sedimentos.
- En la parte sur y central de la península de Baja California, hay un predominio de rocas ígneas (plutónicas y volcánicas) y en la parte norte predominan las rocas plutónicas y metamórficas.
- Los elementos traza con desviaciones estándar muy grandes, se debe a que el lugar de origen y la roca madre varía a lo largo de la zona de estudio. Por tal razón, es de esperarse que las concentraciones sean muy diferentes.

# **APÉNDICES**

## APÉNDICE 1. MÉTODOS ESPECTROFOTOMÉTRICOS.

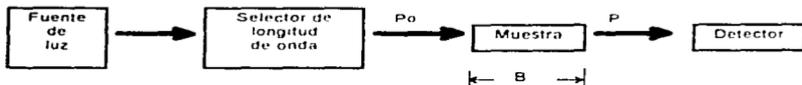
### A) Espectroscopia de Absorción Atómica.<sup>(11)</sup>

La absorción de radiación por átomos en la atmósfera solar se observó por primera vez en 1814. Sin embargo, solo hasta 1953 un físico australiano, Alan Walsh, demostró que la absorción atómica podía usarse como herramienta de laboratorio químico para el análisis cuantitativo. Ahora la absorción atómica es uno de los métodos más ampliamente utilizados en la química analítica.

Cuando una molécula absorbe un fotón, la energía de la molécula se incrementa. Se dice que la molécula pasa a un estado *excitado*. Si una molécula emite un fotón, su energía disminuye. El estado de menor energía de una molécula se llama *estado basal* o *fundamental*.

Cuando una muestra absorbe luz, la *potencia radiante* del haz de luz disminuye. La potencia radiante,  $P$ , se evalúa como energía por segundo por unidad de área del haz de luz. En la figura 11 se ilustra los fundamentos de la medición de espectrofotometría.

FIGURA 11. Principio de la medición espectrofotométrica<sup>(12)</sup>



La luz se hace pasar por un monocromador ( un prisma, una rejilla de difracción o un filtro ) para aislar una sola longitud de onda. Esta última de potencia  $P_0$ , incide sobre una muestra de espesor  $b$ . La potencia radiante del haz emergente es  $P$ ; la muestra puede absorber una fracción de la luz de manera que  $P < P_0$ .

La *transmitancia*  $T$ , se define como la fracción de la luz incidente que sale de la muestra.

$$T = P/P_0$$

(2)

Por lo tanto,  $T$  varía de cero a uno. La *Transmitancia porcentual* es simplemente 100 y varía entre cero y 100%. Una magnitud física más útil es la *absorbancia*, que se define como:

$$A = \log_{10} \left( \frac{P_0}{P} \right) = \log T \quad (3)$$

Cuando no se absorbe luz  $P=P_0$  y entonces  $A=0$ . Cuando se absorbe el 90% de la luz 10% de ella se transmite y  $P=P_0/10$ . Cuando solo se transmite el 1% de la luz  $A=2$ .

La importancia de la absorbancia estriba en que es directamente proporcional a la concentración de la especie absorbente en la muestra:

$$A = \epsilon bc \quad (4)$$

La ecuación anterior es fundamental para aplicar la espectrofotometría, en química analítica y se denomina ley de Lambert-Beer. La absorbancia,  $A$  es adimensional. La concentración de la muestra,  $C$  y suele expresarse en moles por litro (M). La longitud del trayecto,  $b$  se expresa comúnmente en centímetros. La cantidad  $\epsilon$  se llama absorptividad molar (o coeficiente de extinción) y sus unidades son  $M^{-1}cm^{-1}$ . La absorptividad molar es propiedad característica de las sustancias e indica cuánta luz se absorbe a una longitud de onda dada. Un espectro de absorción es una gráfica que indica en qué forma  $A$  (o  $\epsilon$ ) depende de la longitud de onda.

La ley de Beer establece que la absorbancia es proporcional a la concentración de las especies absorbentes. Esto se verifica muy bien en el caso de soluciones diluidas ( $< 0.01$  M) de la mayoría de las sustancias. Las fallas aparentes de la ley de Beer en soluciones con concentraciones más altas pueden atribuirse a cambios de especies absorbentes o en las propiedades de la solución.

Conforme una solución se vuelve más concentrada, las moléculas de soluto interactúan entre sí debido a su proximidad. Cuando una molécula interactúa con otra es probable que cambien las propiedades eléctricas de ambas (incluyendo la absorbancia de la luz). De ello resulta que la gráfica en función de la concentración deja de ser una línea recta.

En cuanto a las interferencias de espectroscopia de absorción atómica, se encuentran muy bien documentadas y son las siguientes:

- **Interferencias espectrales:** ocurre cuando dos señales se interponen y se debe a la poca resolución del monocromador. Se elimina seleccionando otra línea analítica agregando igual cantidad de la especie interferente a los estándares y muestra.
- **Interferencias físicas:** Se debe a diferencias de viscosidad y tensión superficial entre muestras y estándares. La baja viscosidad o tensión superficial implican un flujo alto de la muestra con mejor eficiencia de nebulización y viceversa. Se elimina o compensa realizando los estándares lo más parecido a la muestra.
- **Interferencia química:** ocurre cuando un anión o catión reacciona en la matriz con el analito. Para eliminarlas se puede utilizar agentes quelantes o liberadores, o también separaciones químicas.
- **Interferencias por ionización:** Sucede cuando a temperaturas elevadas de la flama, los átomos con bajos potenciales de ionización se ionizan, disminuyendo la sensibilidad de la determinación. Se corrige adicionando un exceso de un elemento más fácilmente ionizable (supresores) en exceso para inhibir la ionización.

#### **B) Fluorescencia de Rayos X<sup>130</sup>.**

Los rayos X se definen como una radiación electromagnética de longitud de onda corta producida por la desaceleración de electrones de elevada energía o por transiciones electrónicas que implican electrones de los orbitales internos de los átomos.

El intervalo de longitudes de onda de los rayos X va desde aproximadamente  $10^{-4}$  Å hasta alrededor de 100 Å, sin embargo la espectroscopia de rayos X convencional abarca la región de aproximadamente 0.1 Å a 25 Å.

La excitación de una muestra se produce principalmente por irradiación de la muestra con el haz de rayos X proveniente de un tubo de rayos X o una fuente radioactiva. En estas condiciones son excitados por absorción del haz primario y emiten sus propios rayos X fluorescentes característicos. Este procedimiento se llama de manera apropiada, método de

fluorescencia de rayos X. El principio fundamental es: cuando se crea una vacante en una capa electrónica, será llenada por otro electrón y se emitirá un fotón. Si el electrón pertenece a las capas internas, uno de las capas externas pasará a ocupar la vacante y el foton emitido será un rayo X.

Las transiciones a la capa  $K^1$  producen radiación de fotones de rayos X, dando unas líneas que se llaman la serie K, de las transiciones a la capa L resulta la serie L y así sucesivamente. La transición de la capa L a la capa K, da las líneas  $K_{\alpha}$  está compuesta por dos líneas,  $K_{\alpha 1}$  y  $K_{\alpha 2}$ , pero sus energías no son muy diferentes. Para un elemento dado, las longitudes de onda decrecen desde la serie M hasta la serie L, a la serie K porque los electrones caen perdiendo más energía para llenar las vacantes en niveles sucesivamente más próximos al núcleo. Para una línea espectral dada, digamos  $K_{\alpha}$ , la energía crece con el número atómico. Por otro lado, las energías de las líneas de rayos X son independientes del estado químico del átomo.

El proceso productor de rayos X, utilizado en este trabajo fue el de dispersión, el cual consiste en que una partícula cargada incidente (electrón, proton, partícula  $\alpha$ , o ion pesado) golpea un electrón de la capa K y transfiere parte de su energía cinética al electrón. La vacante resultante puede llenarse con algún electrón de capas externas. El proceso también puede ocurrir si es un rayo X o un rayo  $\gamma$  el que transfiere su energía al electrón de la capa K.

La fluorescencia de rayos X (FRX), es uno de los métodos mas ampliamente utilizados de entre todos los metodos analíticos para la identificación cualitativa y cuantitativa de los elementos que tienen numeros atomicos mayores que el oxigeno (>8)

La ley de Beer es tan aplicable a los procesos de absorción de rayos X como a otros tipos de radiación electromagnetica, así, se puede escribir:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \mu X \quad (5)$$

\* El número cuántico n, cuyos valores 1, 2, 3, 4 y 5, definen las capas K, L, M, N y O del momento angular de un electrón.

**ESTA TESTS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

donde  $x$  es el grosor de la muestra en centímetros y  $P$  y  $P_0$  son las potencias de los haces transmitidos e incidentes. La constante  $\mu$  se llama coeficiente de absorción lineal y es característico del elemento al igual que del número de átomos en la trayectoria del haz. Una manera adecuada de escribir la ley de Beer es

$$\ln\left(\frac{P_0}{P}\right) = \mu \rho x \quad (6)$$

donde  $\rho$  es la densidad de la muestra,  $\mu_m$  es el coeficiente de absorción másico, un parámetro que es independiente de los estados físico y químico, tiene unidades de  $\text{cm}^2/\text{g}$

Se encuentran tablas de coeficientes de absorción másicos de los elementos a varias longitudes de onda

En 1912, W. L. Bragg estudió la difracción de rayos X y estableció una ecuación llamada "Ley de Bragg". Cuando un rayo X alcanza la superficie de un cristal a cualquier ángulo  $\theta$ , una porción es dispersada por la capa de átomos de la superficie. La porción no dispersada penetra en la segunda capa de átomos donde otra vez una fracción es dispersada y la que queda pasa a la tercera capa.

La ley de Bragg se representa

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (7)$$

donde  $n$  es un número entero,  $d$  la distancia interplanar del cristal. Hay que señalar que los rayos X parecen ser reflejados por el cristal sólo si el ángulo de incidencia satisface la condición

$$\frac{n\lambda}{2d} = \sin \theta \quad (8)$$

En una aplicación cualitativa, las muestras que se excitan con radiación de un tubo de rayos X se recuperan a continuación sin ningún cambio. Hay que señalar que la abscisa en los instrumentos dispersivos de longitud de onda se representa a menudo en términos de ángulo  $2\theta$ , el cual se puede convertir fácilmente en longitud de onda si se conoce el espacio del cristal monocromador (ecuación 8) La identificación de los picos se completa por referencia a tablas de líneas de emisión de los elementos.

La información cualitativa, se puede convertir en datos semicuantitativos finos, midiendo la altura de los picos.

Los instrumentos modernos de FRX, son capaces de proporcionar análisis cuantitativos de materiales complejos, con una precisión que iguala o supera la de otros métodos instrumentales. Sin embargo, para que la precisión de los análisis alcance este nivel se requiere de estándares de calibrado que se aproximen lo más posible a las muestras tanto en composición química como física o bien de métodos adecuados para considerar los efectos de matriz.

Si se corrigen adecuadamente los efectos de matriz, la espectrometría de FRX es quizás una de las herramientas más poderosas al alcance del químico, para la determinación cuantitativa de todos los elementos, excepto los más ligeros en muestras complejas, tales como muestras geológicas (rocas).

La FRX ofrece un número impresionante de ventajas. Los espectros son relativamente simples, tanto que las interferencias de líneas espectrales son poco probables. Generalmente, el método de rayos X no es destructivo. Otras ventajas incluyen la velocidad y conveniencia del procedimiento, que permite análisis de multicomponentes completos en pocos minutos. Finalmente, la exactitud y precisión de los métodos de FRX a menudo iguala o supera la de otros métodos.

Los métodos de FRX no son generalmente tan sensibles. En el más favorable de los casos, se pueden medir concentraciones de una pocas partes por millón. Sin embargo, normalmente el intervalo de concentración del método es quizás desde 0.01 al 100%. Los métodos de FRX no son adecuados para los elementos ligeros, las dificultades en la detección y en la medida, aumentan progresivamente a medida que los números atómicos disminuyen por debajo de 23 (vanadio), ya que disminuye la intensidad de fluorescencia. Los instrumentos comerciales se limitan a los números atómicos de 5 (boro) o 6 (carbono).

## APÉNDICE 2. ESTADÍSTICA.

### A) Fundamentos<sup>(36)</sup>.

En la tabla 19 se enumeran criterios llamados parámetros de calidad para poder evaluar un determinado método instrumental y así reducir la elección de los instrumentos a tan solo unos pocos.

Tabla 19. Criterios para seleccionar métodos analíticos.

Criterio	Parámetro de calidad
• Precisión	Desviación estándar, coeficiente de varianza y varianza
• Exactitud	Error absoluto sistemático y error relativo sistemático
• Sensibilidad	Sensibilidad de calibración y analítica
• Intervalo de concentración	Concentración entre el límite de cuantificación (LOQ) y el límite de linealidad (LOL).
• Selectividad	Coefficiente de selectividad.

#### Precisión.

El término precisión describe la reproducibilidad de las mediciones, es decir, qué tan cercanos los resultados que se han obtenido *exactamente de la misma manera*. En general, la precisión de una medición está determinada por su repetición.

Para describir una serie de datos repetidos se utilizan tres términos: desviación estándar (cuando se aplica a una muestra pequeña de datos, se llama desviación de estándar de la muestra,  $s$ ). Cuando es una población más grande, se llama desviación estándar de población,  $\mu$ ), varianza ( $s^2$ ) y coeficiente de variación (C.V.).

#### Exactitud

El término exactitud indica qué tan cerca está una medición de su valor verdadero o aceptado, describe la veracidad de un resultado experimental. Estrictamente hablando, el único tipo de medición totalmente exacta es contar objetos. Todas las mediciones contienen errores y dan sólo una aproximación de la realidad

La exactitud se expresa en términos de error absoluto (o sistemático) o error relativo de un método analítico. El error absoluto,  $E_a$  de la media (o promedio)  $\bar{X}$ , de un pequeño conjunto de análisis repetidos viene dado por la relación:

$$E_a = \bar{X} - X_i \quad (9)$$

en la que  $x_i$  es el valor aceptado de la cantidad que se mide. A menudo es útil expresar la exactitud en términos de error relativo, según

$$\text{Error relativo} = \{(\bar{X} - X_i) / X_i\} (100) \quad (10)$$

Muchas veces el error relativo se expresa como un tanto por ciento como se acaba de indicar. Obsérvese que el error absoluto como el error relativo tienen signo, si es positivo indica que el resultado medido es mayor que el valor verdadero y si es negativo, lo contrario.

Para determinar la exactitud hay que analizar uno o varios materiales estándar de referencia cuyas concentraciones de analito se conozcan

En general, al desarrollar un método analítico, todos los esfuerzos se dirigen hacia la identificación de la fuente de error y a su eliminación a corrección mediante el uso de blancos y la calibración del instrumento

### Sensibilidad

Se dice que la sensibilidad de un instrumento o de un método mide su capacidad de discriminar entre pequeñas diferencias entre la concentración de analito. Dos factores limitan la sensibilidad, la pendiente de la curva de calibración y la reproducibilidad o precisión del sistema de medida. Para dos métodos que tengan igual precisión, el que tenga mayor pendiente de la curva de calibración será más sensible. Un corolario a esta afirmación es que si dos métodos tienen curvas de calibración con igual pendiente, el más sensible será aquel que presente la mejor precisión.

La sensibilidad de un espectrofotómetro de absorción de un elemento dado se define como la concentración necesaria de un elemento para producir 99% de transmitancia, la cual corresponde a una absorbancia de 0.004 y se mide por medio de la concentración

característica, la cual establece el intervalo de concentraciones, dentro de las cuales puede ser detectado un analito;

$$\text{Conc. Curad.} = \frac{C \times 0.0044}{A} \quad (11)$$

donde C es la concentración del analito que absorbe a una absorbancia A

La definición cuantitativa más sencilla de sensibilidad es la que adopta la International Union of Pure and Applied Chemists (IUPAC), es la *sensibilidad de calibración*, que se define como la pendiente de la curva de calibración a la concentración de interés.

#### Limites de detección

La definición cuantitativa más aceptada del límite de detección viene dada por la concentración o el peso mínimo de analito que pueda detectarse para un nivel de confianza dado. Este límite depende de la relación entre la magnitud de la señal analítica y el valor de las fluctuaciones estadísticas de la señal del blanco. Así, cuando nos aproximamos al límite de detección, la señal analítica se aproxima a la señal media del blanco. Se calcula entonces como la mínima concentración que puede ser detectada con un 95% de confianza:

$$L.D. = \frac{2.8C}{R} \quad (12)$$

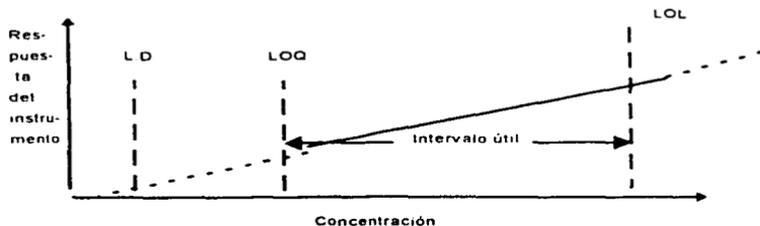
donde S es la desviación estándar relativa, C es la concentración media y la R es el número de repeticiones

Experimentalmente el límite de detección se calcula realizando 20 ó 30 medidas del blanco y del analito

#### Intervalo de concentración

La figura ilustra la definición del intervalo útil de un método analítico, que va desde la concentración más pequeño con la que pueden realizarse medidas cuantitativas (límite de

cuantificación, LOQ) hasta la concentración a la que la curva de calibrado se desvía de la linealidad (límite de linealidad, LOL).



### Selectividad

La selectividad de un método analítico denota al grado de ausencia de interferencias debidas a otras especies contenidas en la matriz de la muestra. Desafortunadamente, ningún método analítico está totalmente inafectado por otras especies y, con frecuencia, diversas etapas se puede realizar para minimizar los efectos de estas interferencias.

### B) Matriz de correlación, varianza y covarianza<sup>(32)</sup>.

Se recordara que una característica de una distribución es la dispersión de datos, representada por la desviación estándar (S) y el cuadrado de esta es la varianza ( $S^2$ ). La varianza se utiliza para calcular propiedades de una variable. Extrapolando este concepto para medir la variabilidad mutua de un par de propiedades, se utiliza la covarianza (COV) que es la variación de dos variables alrededor de una media en común y tienen una interpretación igual que la desviación estándar (si el muestreo tienen un valor alto de varianza o desviación estándar, tiene una alta dispersión de valores).

Para estimar el grado de interrelación de las variables se utiliza el coeficiente de correlación,  $r$ , y es a relación de la covarianza de dos variables entre el producto de sus desviaciones estándar.

$$r_{jk} = \frac{COV_{jk}}{SS_k} \quad (13)$$

Como el coeficiente de correlación es una relación es adimensional. La covarianza puede ser igual pero no exceder el producto de las desviaciones estándar, así que el rango de correlación es de +1 a -1. Una correlación de +1 indica una relación directa perfecta entre dos variables, una correlación de -1 indica que una variable cambia inversamente con relación a la otra variable. Entre los dos extremos hay una relación menos perfecta, incluyendo el cero, el cual indica carencia de cualquier relación lineal.

### C) Análisis de factores<sup>(13)</sup>.

La idea principal de análisis de factores es describir lo mejor que sea posible las variables  $X_1, X_2, \dots, X_p$  en términos de números pequeños o factores y de esta forma, elucidar la relación que existe entre estos factores.

El desarrollo de análisis de factores se debe a Charles Spearman. Supóngase que C, F, E, M, D y Mu son las diferentes materias y la matriz de correlación es la siguiente:

	C	F	E	M	D	Mu
C	1 00	0 83	0 78	0 70	0 66	0 63
F		1 00	0 67	0 67	0 65	0 57
E			1 00	0 64	0 54	0 51
M				1 00	0 45	0 51
D					1 00	0 40
Mu						1 00

Spearman propuso que las calificaciones de estas seis materias se encuentran en la

forma

$$X = aF + e$$

donde X, es la calificación i-esima estandarizada con un valor de cero y la desviación estándar de uno, a, es el peso de cada factor, F es el valor del factor también con un valor de cero y una desviación estándar de 1 y e, es la parte de X y es específico solo a la calificación de la prueba i-esima.

Y el modelo general para análisis de factores está dado por:

$$X_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{im}F_m + e_i$$

donde  $X_i$  es la prueba  $i$ -ésima,  $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}$  es el peso de cada factor de la prueba  $i$ -ésima,  $F_1, F_2, \dots, F_m$  son los factores, y  $e_i$  es el factor específico de la prueba  $i$ -ésima.

Las pruebas sólo pueden correlacionarse si tienen altos pesos de cada factor, y entonces,  $-1 < a_{i1} < +1$

Los datos para un factor de análisis son  $p$  variables con valores individuales,  $n$ . El método de análisis de factores se realiza mediante un programa de computadora, donde lleva a cabo tres pasos para hacer un análisis de factores. Primero hay que se determina un peso de cada factor provisional,  $a_{ij}$  y llamaremos a  $F_1, F_2, \dots, F_m$  como los factores provisionales. El siguiente paso es rotar los factores, donde los factores provisionales se convierten en nuevos factores que son más fáciles de interpretar. Rotar significa encontrar los valores  $d_{ij}$  y la matriz queda:

$$\begin{aligned} F_1 &= d_{11}F_1 + d_{12}F_2 + \dots + d_{1m}F_m \\ F_2 &= d_{21}F_1 + d_{22}F_2 + \dots + d_{2m}F_m \\ &\vdots \\ F_n &= d_{n1}F_1 + d_{n2}F_2 + \dots + d_{nm}F_m \end{aligned}$$

El último paso es calcular los valores de los factores para cada valor individual  $n$ .

El factor de rotación puede ser ortogonal u oblicua. Con una rotación ortogonal, los nuevos factores no se correlacionan como los factores "viejos". Con una rotación oblicua, los nuevos factores se correlacionan. Como quiera que sea el tipo de rotación, lo que se desea es que el peso de cada factor para los nuevos factores sea cercano a cero o muy diferente de cero. Un valor de  $a_{ij}$  cercano a cero significa que  $X_i$  no está fuertemente relacionado al factor  $F_j$ . Un valor grande (positivo o negativo) de  $a_{ij}$  significa que  $X_i$  está determinado por  $F_j$  en gran extensión.

Para darle peso a cada factor usamos la definición de los eigenvalores y eigenvectores. Primero, la operación de eigenvalores siempre se ejecuta la estandarizar la matriz de correlación, asegurando que todas las variables se consideran igual. Los eigenvectores, los

cuales son calculados en la forma normalizada son transformados para definir la longitud de los vectores.

Consideremos el siguiente ejemplo

	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
X <sub>1</sub>	0.68	-0.27	-0.31	0.57
X <sub>2</sub>	0.22	0.70	-0.55	-0.13
X <sub>3</sub>	0.13	0.49	-0.12	-0.75
X <sub>4</sub>	-0.23	0.89	-0.16	-0.02
X <sub>5</sub>	-0.16	-0.11	0.03	-0.90
X <sub>6</sub>	-0.53	-0.03	0.62	-0.33
X <sub>7</sub>	-0.07	0.03	0.91	0.05
X <sub>8</sub>	-0.93	-0.05	0.17	-0.04
X <sub>9</sub>	-0.77	0.23	-0.33	-0.23
peso de cada factor	93%	45%	2%	1.8%

En el factor 1 (que por lo general es el que pesa más entre los demás factores). X<sub>1</sub> tiene una carga altamente positiva y tiene una carga altamente negativa para X<sub>6</sub>, X<sub>8</sub> y X<sub>9</sub>. Por tanto hay que darle mayor énfasis en este factor a X<sub>1</sub>.

En el factor 2 tiene una carga alta positiva X<sub>2</sub> y X<sub>4</sub>, y hay que darle mayor énfasis a X<sub>2</sub> y X<sub>4</sub>.

En el factor 3 tiene una alta carga positiva con X<sub>6</sub> y X<sub>7</sub>, y tienen una alta carga negativa con X<sub>2</sub> y se le da mayor peso a X<sub>6</sub> y X<sub>7</sub> en este factor.

En el factor 4 tiene una alta carga negativa con X<sub>1</sub> y X<sub>5</sub>.

Del peso obtenido en cada factor, hay que darle mayor atención a el factor 1 y 2 ya que contribuyen con una mayor parte que los otros dos factores. Y las características de este conjunto se puede describir con X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> y X<sub>4</sub>.

### APÉNDICE 3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE MINERALES<sup>(1,7,9)</sup>

A) **Rocas ígneas.** El término ígneo proviene de la palabra latin *ignis* que significa fuego. Se produce a partir del enfriamiento y solidificación del material fundido llamado *magma*, el cual es una solución compleja de silicatos, agua y otros gases en condiciones de alta temperatura y que es producto del calor interno de la tierra.

Por tanto, el tipo de minerales que se puede encontrar en una roca ígnea depende de la composición química del magma original. En las rocas ígneas ricas en silicio predominan el cuarzo y el feldespato y son típicamente de color claro y de bajo densidad, como por ejemplo el granito y la riolita, y las rocas pobres en silicio, pero con mayor contenido de hierro y magnesio forman minerales ferromagnesianos como los piroxenos, anfíboles, biotita y olivino que son rocas más oscuras y pesadas. Estos minerales constituyen el 95% del volumen de las rocas ígneas.

**TABLA 20.** Composición química promedio de una roca ígnea<sup>(1,7)</sup>

Compuesto	Composición porcentual
SiO <sub>2</sub>	59.14%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.34%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.30%
MgO	3.49%
CaO	5.08%
Na <sub>2</sub> O	3.84%
K <sub>2</sub> O	3.13%
H <sub>2</sub> O	1.15%
TiO <sub>2</sub>	1.05%
Otros	< 0.30%

Dentro de los elementos traza en rocas ígneas tenemos

<b>Estroncio</b>	Es admitido en minerales de calcio o capturado por minerales de potasio. El Sr se encuentra presente en plagioclasas y feldespatos potásicos.
<b>Manganeso</b>	Esta presente en el magma como ion Mn <sup>2+</sup> y en esta forma es capturado por el Fe <sup>2+</sup> o por Ca <sup>2+</sup> . También es admitido en minerales ferromagnesianos. El Mn reemplaza a veces al calcio.
<b>Niquel</b>	Se encuentra en minerales de magnesio.
<b>Vanadio</b>	En el magma se encontrará como V <sup>5+</sup> . Se encuentra en magnetitas, donde hay Fe <sup>2+</sup> , anfíboles, piroxenos y biotitas.
<b>Cromo</b>	Esta presente en el magma como Cr <sup>3+</sup> . Muestra mucha preferencia el ion ferrico.
<b>Titanio</b>	En rocas ígneas se encuentra presente como ilmenita. Puede reemplazar al aluminio y entonces aparece en piroxenos, hornblenda y biotita.

Además de la gran variedad en composición química y mineral que muestran las rocas ígneas, hay también una variación en su estructura física, que depende del modo de origen de una roca. Si una roca ha sido formada de un magma enterrado a gran profundidad en la corteza terrestre, se tiene que haber enfriado muy lentamente y tardado un periodo largo para su cristalización y solidificación y bajo estas condiciones, las partículas tuvieron oportunidad de crecer de un tamaño considerable. Una roca de origen tan profundo, tiene por tanto, una estructura de grano grueso. Estas rocas se les designa como *plutónicas* o *intrusivas*. Por otra parte si por fuerzas volcánicas, el magma ha sido arrojado sobre la superficie de la tierra, su enfriamiento o solidificación subsiguientes se verifican rápido. Bajo estas condiciones, las partículas minerales tienen poca oportunidad de crecer de buen tamaño y la roca resultante es de grano fino. Estas rocas se les conoce como *rocas volcánicas* o *extrusivas*. Dentro de las rocas ígneas volcánicas se encuentran la felsita, basalto y rocas vítreas. Representando a las rocas ígneas plutónicas, granito, sienita, diorita, gabro, dolerita, peridotita.

**B) Rocas sedimentarias.** El término sedimentario proviene del latín *sedimentum*, que significa asentamiento. Son sedimentos consolidados a partir de restos de otras rocas y son transportados por el viento, agua o hielo a los lugares donde se depositan.

Varios aspectos de la sedimentación son descritos en términos de intemperismo. Solo el cuarzo es altamente resistente al intemperismo. La transformación de la roca madre a sedimento es generalmente acompañada por una disminución marcada en Ca, Mg, Na y K y pocas pérdidas de Al, Fe y un aumento de Si. Las rocas sedimentarias están representadas por cuarzo, calcita, arcilla y fragmentos de roca.

**C) Rocas metamórficas.** La palabra metamórfica se deriva de la palabra griega *meta* que significa cambio y *morphe* que significa forma. El metamorfismo puede ser definido como la suma de procesos que causan la recristalización de la roca como un resultado de cambios pronunciados en temperatura, presión y ambiente químico. Estos cambios afectan la estabilidad física y química de un mineral. La roca original de la que se ha derivado una roca

metamórfica, puede ser ígnea o sedimentaria, estando sujetas a presiones extremas y altas temperaturas. Muchos minerales que eran constituyentes de la roca original pueden existir todavía en ellas después del metamorfismo, hay otros minerales que son de desarrollo característico durante el proceso. Las rocas metamórficas características son: neis, cuarcita, pizarra y mármol.

**D) Minerales óxidos.** Los óxidos son grupos de minerales relativamente duros, densos y refractarios y generalmente existen como minerales acompañantes en rocas ígneas y metamórficas. El más común de todos los óxidos es el óxido de silicio,  $\text{SiO}_2$ , que se considerará en los silicatos. Dentro de los óxidos, hay minerales de importancia económica, como el hierro (hematita y magnetita), cromo (cromita) y manganeso (pirrolusita).

**TABLA 21. Minerales óxidos.**

TIPO	MINERAL	FORMULA
$X_2O$	Cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$
$XO$	Zincita	$\text{ZnO}$
$X_2O_3$	Corindón	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Grupo de la hematita	Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
	Ilmenita	$\text{FeTiO}_3$
$XO_2$	Rutilo	$\text{TiO}_2$
Grupo del rutilo	Pirrolusita	$\text{MnO}$
	Espinela	$\text{MgAl}_2\text{O}_4$
Grupo de la espinela	Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
	Franklinita	$(\text{Fe-Zn-Mn})\text{O}(\text{Fe-Mn})_2\text{O}_4$
	Cromita	$\text{FeCr}_2\text{O}_4$
	Magnesioferrita	$\text{Fe}_2\text{MgO}_4$
	Jacobsita	$\text{Fe}_2\text{MnO}_4$
	Ulvospinela	$\text{Fe}_2\text{TiO}_4$

**E) Carbonatos.** Los carbonatos más importantes se clasifican en tres grupos: grupo de la calcita, grupo de la aragonita y grupo de la dolomita. Ambas son carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$ , y se distinguen en el arreglo estructural. Algunos minerales carbonatados se mencionan a continuación: Calcita,  $\text{CaCO}_3$ ; Magnetita,  $\text{MgCO}_3$ ; Siderita,  $\text{FeCO}_3$ ; Aragonita,  $\text{CaCO}_3$ ; Estrociánita,  $\text{SrCO}_3$ ; Dolomita,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ; Ankerita,  $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$ .

**F) Fosfatos.** Se encuentra representado por el mineral apatita o fluor-apatita  $(CaF)Ca_4(PO_4)_3$ , cuya composición química es 42.3% de  $P_2O_5$  y 55.5% de CaO o la cloro-apatita  $(CaCl)Ca_4(PO_4)_3$ , cuya composición química es 41.0% de  $P_2O_5$  y 53.8% de CaO

La apatita es un mineral ampliamente distribuido en rocas metamórficas. En rocas ígneas se encuentra en granitos, asociado con cuarzo, feldespatos, etc. El Mn y Sr pueden substituir en parte al Ca. Se encuentra en cuerpos titaníferos de magnetita. La apatita es importante por su uso comercial como fertilizante.

**G) Silicatos.** Primeramente, se va a describir los óxidos de silicio. Hay cuatro tipos de óxidos de silicio ( $SiO_2$ ), el cuarzo, la tridimita, crisobalita y el ópalo y se diferencian por su estructura cristalina (las dos primeras presentan una estructura definida, diferente entre sí, y la tercera es amorfa).

Los silicatos son de gran importancia. Del 25% de los minerales conocidos, casi el 40% de los más comunes son silicatos. Con pocas excepciones todas las rocas ígneas son silicatos y constituyen cerca del 90% de la corteza terrestre.

Los minerales dominantes de la corteza terrestre son silicatos, óxidos, y otros compuestos con oxígeno como carbonatos.

Dentro de los silicatos hay varias divisiones, como el grupo de los feldespatos, piroxeno, anfíbol y granate, los cuales se describirán a continuación.

**TABLA 22.** Grupo de los feldespatos

Mineral	Formula	Características
Ortoclasa	$KAlSi_3O_8$	Es un silicato de aluminio y potasio. Con frecuencia se encuentra sodio sustituyendo al K. Es muy común en rocas ígneas encontrándose con frecuencia en plutónicas, también se encuentra en rocas metamórficas.
Microclina	$KAlSi_3O_8$	Se diferencia de la ortoclasa por la estructura cristalina. Ocurre en las mismas condiciones de la ortoclasa.
Anortoclasa	$(Na,K)AlSi_3O_8$	Es un feldespato de sodio-potasio, existiendo el feldespato de sodio en mayor proporción. El calcio ( $CaAl_2Si_2O_8$ ) también se encuentra presente pero en muy pequeñas cantidades.

En el grupo de los feldespatos hay una serie importante que es el de la albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) y la anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) que son completamente miscibles y juntas forman una serie isomorfa que varía del feldespato sódico puro al feldespato de calcio puro. El estudio de rayos X ha demostrado una identidad de estructura en toda la serie y se pueden distinguir por la variación aproximada de composición

	Composición de albita	Composición de anortita
Albita	100 a 90%	0 a 10%
Oligoclasa	90 a 70%	10 a 30%
Andesina	70 a 50%	30 a 50%
Labradorita	50 a 30%	50 a 70%
Bitownita	30 a 10%	70 a 90%
Anortita	10 a 0%	90 a 100%

La albita es un constituyente de muchas rocas ígneas. La oligoclasa es común en rocas ígneas. La labradorita tanto en rocas ígneas volcánicas como plutónicas. La bitownita se encuentra presente raras veces en rocas plutónicas y volcánicas. La anortita es característica de rocas ígneas, tanto volcánicas como plutónicas, etc.

#### GRUPO DEL PIROXENO.

La composición del piroxeno puede ser expresada con la fórmula general



donde X =  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Li}^+$

Y =  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Ti}^{4+}$

Z =  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$

El piroxeno es un mineral muy común en rocas ígneas y es el más importante de los minerales ferromagnesianos. Es un mineral común en caliza, dolomita, serpentina y esquistos metamórficos.

En caliza y otras rocas metamórficas las asociaciones son con frecuencia anfíbol, escapolita, granate, protoclasa, titanita, apatita y algunas veces talco, espinela, rutilo. Las especies del piroxeno están íntimamente relacionadas con las del grupo del anfíbol. Dentro de este grupo se encuentran los minerales: Enstatita ( $\text{MgSiO}_3$ ), Hiperstena [(Fe,Mg)SiO<sub>3</sub>],

Diópsido  $[\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2]$ . Hedenbergita  $[\text{CaFe}(\text{SiO}_3)_2]$ . Acmita  $[\text{NaFe}(\text{SiO}_3)_2]$ . Jadeita  $[\text{NaAl}(\text{SiO}_3)_2]$ . Rodonita  $[\text{MnSiO}_3]$

#### GRUPO DEL ANFIBOL.

La composición química puede ser expresada en la fórmula general:



W =  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$

X =  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$

Y =  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Ti}^{4+}$

Z =  $\text{Si}^{4+}$  y  $\text{Al}^{3+}$

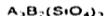
**TABLA 23.** Grupo de anfíbol

Mineral	Fórmula	Características
Antofilita	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2 \text{Si}_6 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	Es producto de rocas metamórficas ricas en Mg.
Cummingtonita	$\text{Fe}_2 \text{Mg}_5 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	Son constituyentes de rocas metamorizadas
Grunerita	$\text{Fe}_7 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	
Tremolita	$\text{Ca}_2 \text{Mg}_5 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	La tremolita se encuentra frecuentemente en arcillas metamorizadas. A altas temperaturas la dolomita es inestable y pasa a ser diópsida. La actinolita es característico de rocas metamórficas.
Actinolita	$\text{Ca}_2 (\text{Mg}, \text{Fe})_5 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	
Hornblenda	$(\text{Ca}, \text{Na})_2 (\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5 \text{Si}_8 (\text{Si}, \text{Al})_2 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	Ocurre en rocas ígneas y metamórficas. Está asociada con plagioclasas.
Glaucófano	$\text{Na}_2 \text{Mg}_3 \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{20} (\text{OH})_2$	El glaucófano se encuentra solo en rocas metamórficas. La riebeckita ocurre más comúnmente en rocas ígneas.
Riebeckita	$\text{Na}_2 \text{Fe}^{2+} \text{Fe}^{3+} \text{Si}_6 \text{O}_{20} (\text{OH})_2$	

Es análoga a los piroxenos, solo se distinguen por su estructura cristalina. Los metales alcalinos, como sodio (Na) y potasio (K) también están presentes, y más comúnmente que en el piroxeno. El Ti está presente algunas veces.

## GRUPO DEL GRANATE.

La composición del granate puede expresarse en la fórmula general:



donde A =  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  y  $Mn^{2+}$

B =  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ .

A presiones y temperaturas altas, el granate es estable en condiciones del manto de la tierra. El granate es un mineral común y ampliamente distribuido; existe abundantemente en rocas metamórficas y como accesorios constituyentes en algunas rocas ígneas. Es característico de esquistos mica, esquistos hornblenda, y neis. Algunos minerales característicos del grupo del granate son: Grosularita,  $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ ; Piropo,  $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$ ; Almandita,  $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$ ; Espesartita,  $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$ ; Andradita,  $Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$ ; Uvarovita,  $Ca_3Cr_2(SiO_4)_3$ .

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Molina Cruz A., 1986 EVOLUCION OCEANOGRAFICA DE LA BOGA DEL GOLFO DE CALIFORNIA. *An. Inst. Cienc. Del Mar y Limnol.* 13 (2) 95-120.
2. Galán Alcalá A., 1988 SEDIMENTOLOGIA DE PLAYAS DE LA MARGEN ORIENTAL DEL GOLFO DE CALIFORNIA. TESIS PROFESIONAL. Facultad de Ingeniería UNAM
3. Moore, J. R. 1978. OCEANOGRAFIA LAS PLAYAS. Ediciones H. Blume. España. Madrid
4. Komar, P. D. 1976. BEACH PROCESSES AND SEDIMENTATION. Prentice Hall New Jersey.
5. Carranza-Edwards A., Caso-Chávez M., 1994. ZONIFICACION DEL PERFIL DE PLAYA GEO-UNAM. Vol. 2 No 2 pags 26-32
6. Scoffin, T. P. 1989. AN INTRODUCTION TO CARBONATE SEDIMENTS AND ROCKS. Blackie & Sons. E. U. A.
7. Mero, John L. 1977. THE MINERAL RESOURCES OF THE SEA. ELSEVIER Scientific Publishing Company. E. U. A.
8. Carranza-Edwards A., Rosales-Hoz L., Aguirre-Gómez A., Galán-Alcalá A., 1988. ESTUDIO DE METALES EN SEDIMENTOS DE SONORA, MÉXICO. *An. Inst. Cienc. Del Mar y Limnol. Univ. Nat. Autón. de México* 15(2). 225-234
9. Klein Cornelius & Hurbult Cornelius Jr. 1986. MANUAL OF MINERALOGY. 2ª Edición. John Wiley & Sons. Sangapore
10. Leet D. L. y Judson S., 1984. FUNDAMENTOS DE GEOLOGIA FISICA. Editorial LIMUSA México.
11. Longwell R. C. & Flint F. R. 1983. GEOLOGIA FISICA. Editorial LIMUSA México.
12. Faure G., 1991. PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF INORGANIC GEOCHEMISTRY. McMillan Publishing Company E. U. A.
13. M. Libes S., 1992. AN INTRODUCTION TO MARINE BIOGEOCHEMISTRY. John Wiley & Sons. U.S. A.
14. Nesbitt, H. W. & Young G. M. 1984. PREDICTION OF SOME WEATHERING TRENDS OF PLUTONIC AND VOLCANIC ROCKS BASE ON THERMODYNAMIC AND KINETIC CONSIDERATION. *Geochim. Cosmochim. Acta* (48): 1523-1534

15. Rosales-Hoz L. y Carranza-Edwards A. 1995 GEOCHEMISTRY OF TWO MEXICAN TROPICAL BASINS IN AN ACTIVE MARGIN AND THEIR INFLUENCE ON LITORAL SEDIMENTS *Journal of South American Earth Science* 8 (2) 221-228
16. Plummer, Ch C and McGeary, D 1991 PHYSICAL GEOLOGY 5<sup>th</sup> ed Wn C Brown Publishers, Dubuque, IA
17. De La Lanza G. 1991 OCEANOGRAFIA DE MARES MEXICANOS AGT editor, S A México, D.F
18. Carranza-Edwards A., Rosales-Hoz L y Santiago-Pérez S., 1996 A RECONNAISSANCE STUDY OF CARBONATES IN MEXICAN BEACH SANDS *Sedimentary Geology* 101, 261-268
19. Rogers G., A D Saunders, D J et al 1985 GEOCHEMISTRY OF THE HOLOCENE VOLCANIC ROCKS ASSOCIATED WITH RIDGE SUBDUCTION IN BAJA CALIFORNIA, MEXICO. *Nature* 315 (30), May, 389-392
20. Byrne J V 1957 THE MARINE GEOLOGY OF GULF OF CALIFORNIA Tesis Doctoral Univ. Sur de California
21. Van Andel, T H 1964 RECENT MARINE SEDIMENTS OF GULF OF CALIFORNIA. In A Symposium MARINE GEOLOGY OF GULF OF CALIFORNIA Shor Scripps Inst Oceanography University of California Memoir 3
22. Tamayo L J 1970 GEOGRAFIA MODERNA DE MEXICO, ed Trillas Mexico
23. Carranza-Edwards, A., M. Gutierrez-Estrada y R. Rodríguez Torres. 1975 UNIDADES MORFOTECTONICAS CONTINENTALES DE LAS COSTAS MEXICANAS *An. Centro Cienc Del Mar y Limnol.* Univ Nat Auton Mexico, 2(1) 81-88
24. Castellan G W 1987 FISICOQUIMICA 2<sup>a</sup> ed Addison-Wesley Iberoamericana E U A
25. Páez Osuna F y Fung-Lee M L 1984 COMPARACION DE TRES TECNICAS PARA ANALIZAR MATERIA ORGANICA EN SEDIMENTOS *An. Inst Cienc Del Mar y Limnol Univ Nat. Autón de México*, 11 (1) 257-264
26. Fernando Ortega Gutierrez 1992 TEXTO EXPLICATIVO DE LA QUINTA EDICION DE LA CARTA GEOLOGICA DE LA REPUBLICA MEXICANA. México, D. F. Instituto de Geología, UNAM.

27. Brownlow, A.H. 1990. GEOCHEMISTRY. Prentice-Hall. E.U.A.
28. Salisbury Dana E. 1986. TRATADO DE MINERALOGIA. 4ª. Edición. Editorial CONTINENTAL. México.
29. Willard H. Hobart. Merrit L. Lynne, et al. 1988 METODOS INSTRUMENTALES DE ANALISIS Editorial IBEROAMERICANA Mexico
30. Skoog, Leary. 1994. ANALISIS INSTRUMENTAL 4ª Edición Mc Graw-Hill España.
31. Harris C. D. 1992. ANALISIS QUIMICO CUANTITATIVO Editorial IBEROAMERICANA. México.
32. John C. Davis. 1986. STATISTICS AND DATA ANALYSIS IN GEOLOGY 2ª. Edición. John Wiley & Sons. Sangapore.
33. Chatfield, C. and Collins, A. J 1980 INTRODUCTION TO MULTIVARIATE ANALYSIS. Chapman & Hall. Gran Bretaña
34. Mason. 1952. PRINCIPLES OF GEOCHEMISTRY 3ª. ed. John Wiley & Sons, U.S.A.